



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

Número especial  
**PRESIÓN Y CRISIS EN LOS  
RECURSOS HÍDRICOS**

# Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

2

VOL. 13  
SEPTIEMBRE 2021



Publicado en el 2021 por el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

*Published in 2021 by the Intergovernmental Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*

ISSN 1688-2881

© UNESCO septiembre 2021

Fotografía de portada: © Guillermo Leal Báez

Lugar: Puente Rocosó, Aruba.

Debido a la naturaleza intergubernamental de la UNESCO, la Organización se reserva los derechos de notificar en todas las publicaciones de Aqua-LAC que “Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización”.

*Due to the intergovernmental nature of UNESCO, the organization reserves the right to state in all Aqua-LAC publications that “The designations employed and the presentation of material throughout the journal do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The authors are responsible for the facts and opinions expressed therein, which are not necessarily those of UNESCO and do not commit the Organization”.*

Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
Oficina Regional de Ciencia para América  
Latina y el Caribe  
UNESCO

Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: + 598 2 413 20 75  
Fax: + 598 2 413 20 94  
aqualac@unesco.org

Centro de Investigaciones del Agua  
Campus Universitario Cerro de las Campanas  
Facultad de Ingeniería, UAQ  
76010 Querétaro, México  
aqualac@uaq.mx

---

---

**CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS**

**MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO**

Institute of Water and the Environment, INWE  
Florida International University, USA

**BLANCA JIMÉNEZ**

Embajadora de México en Francia

**EDUARDO PLANOS**

Instituto de Meteorología, INSMET, Cuba

**EVENS EMMANUEL**

Université Quisqueya, Haití

**JUAN CARLOS BERTONI**

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

**LUCILA CANDELA**

Universidad de Cataluña-UPC, Barcelona, España

**VIRGINIA GARCÍA ACOSTA**

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México

**ROBERTO PIZZARO**

Universidad de Talca, Chile

**WILL LOGAN**

Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWarm), USA

**MIGUEL DORIA**

Programa Hidrológico Internacional, Hidrólogo Regional para América Latina y el Caribe de la UNESCO

---

---

## CONSEJO EDITORIAL

**Marilia Carvalho de Melo**

Instituto Mineiro de Gestão das Águas, IGAM, Brasil

**Waldo Lavado-Casimiro**

Facultad de Meteorología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

**Henrique Marinho Leite Chaves**

Faculdade de Tecnologia-EFL pós-graduação e Universidade de Brasília, Brasil

**Manuel Fernando Luna Lemus**

Escuela de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala

**Ninell Janett Dedios Mimbela**

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, Perú

**Poliopro Fortunato Martínez Austria**

Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería, México

**Lilian del Castillo Laborde**

Facultad de Derecho de la Universidad de Buenos Aires, Argentina

**Mauro Nalesso**

Water & Sanitation Division Inter-American Development Bank, USA

**Evens Emmanuel**

Université Quisqueya, Haití

**Marta del Carmen Paris**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Argentina

**Pablo A. Garcia-Chevesich**

University of Arizona, USA

**Jorge Víctor Pilar**

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Chaco, Argentina

**Fernanda Julia Gaspari**

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata, Argentina

**Diego Alejandro Pérez Giraldo**

Universidad Libre de Colombia

**Hugo G. Hidalgo**

Centro de Investigaciones Geofísicas. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

**Mauricio Pinto**

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

**Lili Ilieva**

Senior Analyst, ECo Ltd.

**Denilson Teixeira**

Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Brasil

---

---

**STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF**

**M. Alfonso Gutiérrez López**

Editor en Jefe / *Editor in Chief*  
Facultad de Ingeniería, UAQ, México

**Miguel Doria**

Editor Ejecutivo / *Executive Editor*  
Editor Asociado Inglés

**José Leopoldo Vargas Baecheler**

Editor Asociado Español  
Universidad de Concepción, Chile

**Henrique Marinho Leite Chaves**

Editor Asociado Portugués  
Universidad de Brasilia, Brasil

**Evens Emmanuel**

Editor Asociado Francés  
Université Quisqueya, Haití

**José Alejandro Vargas Díaz**

Responsable de herramienta OJS

**Luis Avilés Ríos**

Responsable de Indexación

**Sabrina Cupeiro**

Asistente de Edición

**Ivonne Monserrat Cruz Paz**

Asistente de Indexación

**Marcela Salas Salazar**

Asistente de herramienta OJS

**Jacqueline Gómez Martínez**

Asistente de Arbitraje

---

---

## EDITORIAL

La Cátedra Unesco en “Hidrología de Superficie: investigación, conocimiento y difusión en escenarios de incertidumbre climática”, Cátedra que es avalada por las universidades de Talca y de Chile, en Chile, posee por norte fortalecer la cooperación científica y tecnológica entre universidades e instituciones de investigación del país, y de la Región de Latinoamérica y el Caribe (LAC). Sus objetivos específicos son por una parte generar un mayor conocimiento científico y tecnológico en materia de hidrología superficial y su aplicabilidad en el contexto de la producción industrial y la sustentabilidad ambiental, mediante la generación de redes de trabajo que permitan la postulación a fondos concursables para el desarrollo de proyectos de I+D+i; y por otra mejorar la difusión de conocimientos hidrológicos, previos y adquiridos, a la comunidad científica y civil, a través de la utilización de métodos de aprendizaje electrónico y tradicional, y por medio de la aplicación de mecanismos de transferencia de conocimientos.

En este contexto y derivado de la existencia de la revista científica Aqua-LAC, surgió la idea de realizar un número especial relativo a la presión sobre los recursos hídricos y así se planteó desde la creación de la Cátedra en el año 2018. Esa idea, discutida y aceptada con el editor en jefe de la revista Aqua-LAC, se definió como una meta de la Cátedra. Sin embargo, su concreción se vio retrasada por efectos de la pandemia por Covid-19.

Un número especial relativo a la presión sobre los recursos hídricos, es importante en un país como Chile y también en la Región de Latinoamérica y el Caribe. Y ello es muy relevante porque los recursos hídricos son fundamentales para el desarrollo de los países de la Región. Así, en el plano de los alimentos, la agricultura es la base de la sostenibilidad básica de la población, pero también es una componente importante de las exportaciones y de la generación de divisas de los países. Pero esa agricultura demanda recursos hídricos en altas cantidades y también demanda crecientemente nuevos territorios. Estos territorios en muchos casos están ocupados por bosques y zonas ecológicas de relevancia para la mantención de los equilibrios hídricos de los ecosistemas, y eso define una presión que en muchos casos se torna insostenible.

En el mismo marco, la minería es una importante generadora de divisas para los países de la Región LAC, pero demanda agua en importantes cantidades y muchas veces en territorios áridos e hiper-áridos, que no la poseen en cantidades suficientes para este tipo de actividades. A ello se suma la presencia en muchos casos de actividades contaminantes que dañan ambientalmente los sistemas ecológicos y generan externalidades negativas que no siempre son bien evaluadas.

El uso doméstico en zonas urbanas y rurales es otro componente importante de la ecuación de sustentabilidad de los recursos hídricos y en este caso con mayor relevancia, dado que para la mayoría de los países, es la actividad que posee la primera prioridad, porque se trata de satisfacer un derecho básico para las personas. Pero ese objetivo no siempre se consigue y aún más, está lejos de ser alcanzado, especialmente en zonas rurales, y ello por diversos motivos. Lo mismo ocurre con otros sectores como el turismo, forestal, acuicultura, etc.

En función de lo anterior este número especial de Aqua-LAC, que se realiza en conjunto con la Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie de Chile, ha intentado abarcar estas temáticas de presión sobre los recursos hídricos, en escenarios de incertidumbre y cambio climático. Para ello se ha acudido a diversos autores y diversas temáticas, que van desde la contaminación hídrica, hasta el derretimiento y pérdida de masa glacial, pasando por actividades agrícolas y su impacto en la disponibilidad de agua, y el diseño eficiente de sistemas de captación de aguas lluvias, entre otras temáticas. A ello se suma un artículo que ha reunido a diversos hidrólogos e hidrólogas chilenas, quienes han hecho una propuesta de políticas y actuaciones públicas en el área de los recursos hídricos para los próximos años, hecho que puede ser muy relevante en el objetivo de orientar a los tomadores de decisión respecto al camino que se debe trazar y recorrer para alcanzar un uso sustentable del agua, desde un punto de vista ecosistémico, productivo y social.

**Roberto Pizarro Tapia**

Cátedra UNESCO en Hidrología de Superficie: investigación, conocimiento y difusión  
en escenarios de incertidumbre climática

---

---

## CONTENIDO / CONTENTS

Propuestas de actuación a corto y mediano plazo para los recursos hídricos en Chile en escenarios de restricción hídrica <i>Proposals for short- and medium-term actions for water resources in Chile under water restriction scenarios</i> .....	1
Roberto Pizarro, José Luis Arumí, Pablo García-Chevesich3, Gabriel Mancilla, Alejandra Stehr, Claudia Sangüesa, Elisabeth Lictévout, Alfredo Ibáñez, Rodrigo Valdés-Pineda, Pablo Jaeger, Alfonso Gutierrez-Lopez [ Nota Técnica ]	
Characterization of hydrogeological dynamics through summer runoff analysis and runoff hydrograph separation in two watersheds of Chiloé, Chile <i>Caracterización de la Dinámica Hidrogeológica Mediante el Análisis de la Escorrentía Estival y la Descomposición del Hidrograma de Escorrentía en dos Cuencas de Chiloé</i> .....	11
Daniel Paez, Jose Luis Arumi, Jerónimo Paredes [ Artículo de investigación ]	
Evaluación de humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales rurales en la Región del Maule: análisis del potencial de reutilización de sus efluentes en riego <i>Evaluation of constructed wetlands planted with ornamental plants for rural wastewater treatment in Maule Region: analysis of potential effluent reuse in irrigation</i> .....	26
Ismael L. Vera-Puerto, Luis Rojas, Claudio Contreras, Franklin Zuñiga, José López, Claudia Sangüesa, Christian Correa, Carlos A. Arias, Mariela Valenzuela [ Artículo de investigación ]	
Variaciones de área y volumen del sistema glaciar San Francisco (1955-2020), a partir de imágenes satelitales y ley de potencias, cuenca del río Volcán, Región Metropolitana <i>Area and volume variations of the San Francisco glacier system (1955-2020), from satellite images and power law, Maipo River Basin</i> .....	42
Solange Margarita Jara Ortega, Gino Casassa Rogazinski [ Artículo de investigación ]	
Diseño eficiente de Sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales para su aplicación en zonas con demandas crecientes <i>Efficient design of rainwater harvesting systems in rural areas for application in areas with increasing demands</i> .....	53
Claudia Sangüesa Pool, Carlos Vallejos Carrera [ Artículo de investigación ]	
Presión hídrica en una cuenca del trópico húmedo y propuestas para su mitigación <i>Water pressure in a basin of the humid tropics and proposals for its mitigation</i> .....	65
Anne M. Hansen, Abel A. Ruiz Castro [ Artículo de investigación ]	

---

---

Gobernanza de los recursos hídricos en Chile reducción de la brecha regulatoria <i>Governance of water resources in Chile reduction of the regulatory gap</i> .....	79
Carlos Estévez Valencia	[ Artículo de investigación ]
Plantaciones forestales, bosque nativo, y su efecto en la producción de agua en micro-cuencas del centro sur de Chile <i>Forest plantations, native forest, and its effect on water production in micro-basins of south central Chile</i> .....	99
Oscar Hernández Acuña	[ Artículo de investigación ]
Situación del abastecimiento de agua a las poblaciones rurales en México: estudio de caso en San Luis Potosí <i>Situation of water supply to rural populations in Mexico: case study in San Luis Potosí</i> .....	115
Carlos Estévez Valencia	[ Artículo de investigación ]
Comparación de precipitaciones diarias máximas anuales medidas en forma discreta y continua en zonas del centro sur de Chile <i>Comparison of annual maximum daily rainfall measured in a discrete and continuous way in areas of south-central Chile</i> .....	138
Esteban Celis Recabal	[ Artículo de investigación ]

---



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

## Propuestas de actuación a corto y mediano plazo para los recursos hídricos en Chile en escenarios de restricción hídrica

*Proposals for short- and medium-term actions for water resources in Chile under water restriction scenarios*

Roberto Pizarro<sup>1\*</sup>, José Luis Arumi<sup>2</sup>, Pablo García-Chevesich<sup>3</sup>, Gabriel Mancilla<sup>4</sup>, Alejandra Stehr<sup>5</sup>, Claudia Sangüesa<sup>1</sup>, Elisabeth Lictevout<sup>5</sup>, Alfredo Ibáñez<sup>1</sup>, Rodrigo Valdés-Pineda<sup>6</sup>, Pablo Jaeger<sup>7</sup>, Alfonso Gutierrez-Lopez<sup>8</sup>

Recibido: 7/10/2021

Aceptado: 8/11/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El agua es el principal recurso natural de Chile. En ella se basa la estructura productiva, ambiental y de desarrollo económico y social, representando un 60% del PIB del país. Siendo un país 3 veces más rico desde 1990, gasta tres veces más agua en igual periodo en una ecuación no sustentable. A esto se suman un cambio climático que reduce las ofertas de agua y un escenario legal, para el cual se exigen cambios a la forma de otorgamiento y uso de los derechos de agua. El artículo propone actuaciones de corto y mediano plazo. Para ello estructura una serie de propuestas generales y otra serie de propuestas específicas en base a los siguientes ejes: a) Investigación y desarrollo b) Sectores productivos c) Propuestas institucionales d) Propuestas para la Nueva Constitución e) Medio ambiente, agua y sociedad f) Educación y capacitación, y g) Calentamiento Global o Cambio Climático. Entre las propuestas generales se plantea relevar el rol ambiental, social y productivo de los recursos hídricos, así como la captación de recursos económicos. En el caso de I+D, se propone la creación de fondos públicos de investigación en el agua. En el plano institucional se propone la implementación de un plan nacional de recursos hídricos. Respecto a la nueva constitución, se propone que el agua debe estar muy bien definida como bien nacional de uso público. Finalmente, el artículo apunta a orientar a los tomadores de decisión en el objetivo de entregar sustentabilidad a la gestión del agua en Chile.

**Palabras clave:** Medio ambiente, agua, sociedad, sector productivo, cambio climático, Chile

### Abstract

*Water is the main natural resource in Chile. The productive, environmental, and economic and social development structure is based on it, representing 60% of the country's GDP. Being a country 3 times richer since 1990, it uses three times more water in the same period in an unsustainable equation. Added to this, there are a climate change that reduces water supplies and a legal scenario, for which changes are required in the way of granting and using water rights. The article proposes short and medium term actions. For this, it structures a series of general proposals and another series of specific proposals based on the following axes: a) Research and development b) Productive sectors c) Institutional proposals d) Proposals for the New Constitution e) Environment, water and society f) Education and training, and g) Global Warming or Climate Change. Among the general proposals, it is proposed to highlight the environmental, social and productive role of water resources, as well as the capture of economic resources. In the case of R&D, the creation of public funds for research in water is proposed. At the institutional level, the implementation of a national plan for water resources is proposed. Regarding the new constitution, it is proposed that water should be very well defined as a national good for public use. Finally, the article aims to guide decision makers in the objective of delivering sustainability to water management in Chile.*

**Keywords:** Environment, water, society, productive sector, climate change, Chile

- 1 Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, U. de Talca, U. de Chile, Chile. rpizarro@utalca.cl, csanguesa@utalca.cl, alfredoibacor@gmail.com
- 2 Universidad de Concepción, Chile. jarumi@udec.cl
- 3 Colorado School of Mines, Department of Civil and Environmental Engineerig, Estados Unidos. pablogarciach@gmail.com
- 4 Centro del Agua para las Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe, CAZALAC, Unesco. gmancilla@cazalac.org
- 5 Fundación Carpe Science, Chile. astehr@udec.cl, elisabeth.lictevout@gmail.com
- 6 University of Arizona, Estados Unidos. rvaldes@arizona.edu
- 7 Consultora Diagua, Chile. pjaeger@diagua.cl
- 8 Centro de Investigaciones del Agua-Queretaro (CIAQ). Universidad Autónoma de Queretaro. Mexico. International Flood Initiative, Latin-American and the Caribbean Region (IFI-LAC), Intergovernmental Hydrological Programme (IHP-UNESCO), 76010 Queretaro, Mexico. alfonso.gutierrez@uaq.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son particulares para el desarrollo de una sociedad (Unesco, 1987), derivado que son vitales para el accionar, la sobrevivencia y la sustentabilidad ambiental de esta. Adicionalmente, el agua manifiesta una problemática particular por ser un elemento vital que cruza transversalmente todo el accionar de un conglomerado humano, incluyendo el espacio natural de los ecosistemas. Así y según UNESCO (1982), los problemas por el uso de los recursos hídricos surgen desde dos vertientes: a) Entre lo que ofrece la naturaleza y lo que demandan o necesitan las personas, para la vida y la producción; y b) Los conflictos entre las personas por el uso de la misma oferta.

En el caso de Chile, el agua es el principal recurso natural del país, puesto que en ella descansa la estructura productiva, ambiental y de desarrollo económico y social del país. Así, por ejemplo, la minería que es la actividad económica productiva más importante y que depende del agua, representa un 15% del Producto Interno Bruto. Pero, según la ex Delegación Presidencial de Recursos Hídricos, existente en el país durante el gobierno de la presidenta Michelle Bachelet, el agua explica el PIB de Chile hasta en un 60%. Por tanto, el crecimiento económico del país se sustenta en el agua. Por otra parte, si se analiza el crecimiento del PIB del país y según la misma Delegación Presidencial de Recursos Hídricos, este ha crecido entre 3 a 3.5 veces desde el año 1990 a la fecha (Unesco, 2019); pero, en la misma proporción ha crecido el consumo de agua y durante el mismo periodo. Y esa parece ser una ecuación no sustentable, en un escenario de cambio climático que ha definido una importante caída en las ofertas de lluvia, especialmente en la zona central y norte del país (Bellisario *et al.*, 2013).

En el contexto de la incertidumbre climática, Chile está siendo afectado en su zona central por una megasequía que ya lleva 10 años (CR2, 2015; Garreaud *et al.*, 2017). Esto determina que las ofertas de agua se estén reduciendo y agrega una mayor incertidumbre a un proceso de crecimiento económico basado en recursos naturales. Según la Unesco, la mínima disponibilidad de agua para que exista un desarrollo sustentable es de 1,700 m<sup>3</sup>/habitante/año; pero de Santiago al norte la disponibilidad del recurso hídrico es en promedio de 1,000 m<sup>3</sup>/habitante/año (Banco Mundial, 2011, Valdés-Pineda *et al.*, 2014). De Santiago al Sur

(ubicado a alrededor de los -33.45 de latitud Sur) los recursos son cuantiosos, muy por sobre la media mundial. No obstante, también se verifican restricciones importantes en la disponibilidad de agua en la zona sur bajo climas sub-húmedos y húmedos, lo que habla de que algo se ha hecho mal.

A lo anterior se suma el hecho que los desequilibrios hídricos afectan la sustentabilidad ambiental país, especialmente en lo referido a la mantención de los ecosistemas. Así, a todo nivel se han visto afectados los equilibrios hídricos por sobreuso, por contaminación y por disminución de la oferta, producto del cambio climático (ONU, 2021). Y esto es muy importante, máxime si la discusión sobre la gestión del agua tiende a obviar que una menor calidad también significa una menor cantidad, debido a que existe una menor disponibilidad para el uso diverso, comenzando por la mantención sustentable de los ecosistemas. Una cantidad adecuada de agua de buena calidad es necesaria para lograr seis de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), para la salud (ODS 3), seguridad alimentaria (ODS 2), seguridad del agua (ODS 6), ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11), y ecosistemas marinos y terrestres (ODS 14 y 15).

Si lo anterior es preocupante, la sociedad chilena carece de una cultura de cuidado del agua y no toma conciencia de la magnitud del problema. Quizás derivado de que se cuenta con un recurso de calidad, especialmente en las ciudades, que está disponible y que tras su uso es tratado para volver a los cauces naturales, la población no percibe el valor de este recurso, no solo desde un punto de vista económico, sino más importante aún, desde una perspectiva ambiental y ecosistémica. Y, por tanto, hay una carencia evidente de una cultura de cuidado del agua para garantizar su sustentabilidad en el corto y mediano plazo.

Otro aspecto importante de analizar está referido a que el país no cuenta con una estrategia nacional de recursos hídricos moderna, inclusiva y democrática (Valdés-Pineda *et al.*, 2014; Costa, 2016), la cual debe poseer componentes de efectividad y operatividad expresada en métricas bien definidas, metas a alcanzar, responsables institucionales y un adecuado seguimiento de todos los aspectos establecidos. La carencia de una estrategia nacional de manejo de recursos hídricos, influye en la gestión de los territorios, y en la disponibilidad de los cuerpos y las fuentes de agua, además de generar

efectos de menoscabo humano, económico, ambiental y cultural, lo que contribuye a generar una situación de inequidad y desigualdad social (Larraín, 2006; García, 2020; Correa y Muñoz, 2015; García, 2020). De hecho, las actuales propuestas estratégicas no van más allá de ser un simple documento, donde los Servicios relacionados no se comprometen más allá que lo que están haciendo normalmente, por lo tanto, no cuentan con financiamiento real ni con una estrategia operativa.

En el mismo contexto, se verifica en Chile que la gestión del agua se encuentra desagregada. Según el Banco Mundial (2013), Chile posee una institucionalidad no acorde con una gestión sustentable del agua, por existir más de 42 instituciones con competencias sobre el agua, y porque se debilita la acción de algunas que deberían poseer un rol más preponderante como es la Dirección General de Aguas. A esto se suma de forma lineal el hecho que existen carencias de capacidades de gestión, desde un punto de vista técnico, económico y social, lo que significa que ellas se manifiestan a nivel de gestores locales, pero también a nivel de cuencas y cauces.

Asociado a la problemática de la gestión, los derechos de agua han sido asignados en base a un liberalismo extremo, sin consideraciones ecosistémicas, separando el suelo del agua, lo que redundaría en factores de inequidad social. La legislación relativa al código de aguas, dictada en 1981, dejó una estela de asignaciones de derechos de agua que en su otorgamiento no consideraron aspectos de equidad social ni de equilibrios ecosistémicos, ni menos consideraron escenarios de restricción e incertidumbre climática, lo que es necesario corregir (Herrera *et al.*, 2019) para enfrentar los escenarios futuros de escasez y garantizar la seguridad hídrica nacional.

Todos los aspectos reseñados precedentemente, se ven agudizados por dos situaciones de alto riesgo. Por una parte, el cambio climático agrega restricción e incertidumbre al escenario nacional, lo que define altas dosis de indefinición en las actuaciones técnicas, por una situación de amenaza en ciernes, que ha definido cambios en el patrón de distribución de las lluvias (Quintana y Aceituno, 2015); ascensos en la isoterma cero (Carrasco *et al.*, 2005) y en las temperaturas, principalmente las mínimas, sumado a un notable retroceso de las masas glaciares, entre otros aspectos (Garín, 2018). Lo anterior define cambios y modificaciones de las variables que

definen el ciclo hidrológico, que de por sí son difíciles de medir, cuantificar e identificar. A esto se suma una segunda situación, cual es que la investigación en torno al agua no cuenta con recursos financieros claramente establecidos. Si toda la investigación científica y tecnológica que Chile desarrolla es sustentada por sólo el 0.38 del PIB (Unesco, 2019), la investigación en recursos hídricos alcanza según cifras del Comité Chileno para el Programa Hidrológico Intergubernamental de la Unesco, al 0.0025%, lo que habla por sí solo del nivel de descompensación de las investigaciones en Chile y de la escasa relevancia que se le otorga al agua como factor productivo sujeto de investigación y de desarrollo tecnológico.

Finalmente, en este análisis somero de la situación de los recursos hídricos en Chile, el agua es también factor de riesgo y destrucción (IPCC, 2014; Henríquez *et al.*, 2016), es decir no siempre posee esa cara positiva y amable como factor de sustentabilidad ecosistémica, o como factor productivo determinante. Y ello se verifica cuando el agua, en su tránsito en condiciones de torrente y derivado de la geografía física y del comportamiento de las precipitaciones en Chile, en muchos casos se transforma en un factor de devastación y de destrucción de bienes físicos y pérdida de vidas humanas (Mardones y Vidal, 2001). En el otro extremo, las situaciones de sequía prolongadas generan contextos de alto impacto, que en muchos casos deben ser tomadas más que como un fenómeno extremo de probabilidad variable, como un fenómeno recurrente del pasado, presente y futuro (Velasco *et al.*, 2005), con el cual es importante saber adaptarse para poder sobrevivir de la mejor forma.

En base a este diagnóstico, se plantea un conjunto de propuestas de actuación en recursos hídricos, para el periodo 2021-2030, esperando aportar a una visión país, que sea sustentable en lo que respecta al uso y gestión de los recursos hídricos, en escenarios de incertidumbre climática, política y social. De igual forma, estas no pretenden ser un inventario definitivo de ideas de actuación en estas materias, pero representan el sentir de los autores, para un Chile futuro que seguirá dependiendo profundamente del manejo sustentable de los recursos hídricos, para su desarrollo económico, social y ambiental. Por tanto, esta serie de propuestas, hecha por especialistas que provienen de las ciencias hidrológicas y del derecho, está abierta a contribuciones y otras visiones, con el fin de ampliar la discusión de la temática y establecer estrategias de desarrollo nacional en el corto y mediano plazo.

Las propuestas se estructuran por una parte en una serie de ideas de **actuaciones generales de actuación**, que abordan aspectos de amplio espectro, necesarios para poder enfrentar una adecuada gestión de los recursos hídricos. Una segunda dividida en propuestas específicas, establecidas con base en **siete ejes rectores**:

Eje I. Investigación, desarrollo tecnológico e innovación

Eje II. Sectores productivos

Eje III. Propuestas institucionales

Eje IV. Propuestas para nuevas normativas (constitución, leyes, reglamentos, etc)

Eje V. Medio ambiente, agua y sociedad

Eje VI. Educación y capacitación

Eje VII. Cambio Climático

## 2. PROPUESTAS GENERALES DE ACTUACIÓN

Para abordar una gestión sustentable en escenarios de restricciones de oferta de agua y demandas crecientes, se proponen seis medidas que deben dar un marco global a la gestión hídrica de un país dependiente del agua para su crecimiento, la equidad social y la sustentabilidad de sus ecosistemas.

### *Actuación 1. Relevar el rol ambiental, social y productivo de los recursos hídricos*

Para un país dependiente de agua, es necesario generar una visión de largo plazo e integral (transversal), acerca del rol que cumple este recurso natural, amenazado por escenarios de incertidumbre climática y un sobreuso evidente y preocupante. Esto define la necesidad de políticas educativas a la población en general, y de una clase política consciente y presente en el abordaje de la problemática, independiente de sus legítimas consideraciones doctrinarias e ideológicas.

### *Actuación 2. Captación de recursos para el financiamiento de una gestión eficiente*

El objetivo de fortalecer la gestión en recursos hídricos y de relevar su rol, requiere capital humano y financiero, para implementar actuaciones eficientes. Este fin demanda la necesidad de contar con mayores

recursos, dada la creciente importancia del agua para el desarrollo país, para la vida digna de sus habitantes, y para un adecuado funcionamiento de los ecosistemas. Por ende, se propone establecer un impuesto al agua, esto es, un impuesto a los titulares de derechos de aprovechamiento, eliminando el diferencial de pago del impuesto territorial que distingue entre áreas de riego y secano. Asimismo, se propone la búsqueda de financiamiento externo a largo plazo, en un marco de tasas preferenciales, en el marco del Banco Mundial, BID u otras instancias de cooperación y financiamiento.

### *Actuación 3. Favorecer proyectos integrales e integradores de disciplinas y sectores*

Para propiciar una sinergia en la actuación en recursos hídricos, es preciso favorecer, apoyar e incentivar los proyectos integrales, multi e interdisciplinarios, que promuevan la convergencia de actores académicos, productivos, ambientales y de la sociedad civil, sobre todo en el ámbito científico. Y esto debe tener un correlato en los diversos escenarios regionales que posee el país, con el fin de otorgar capacidad de integración a las singularidades territoriales de un país muy diverso. Por ejemplo, es sumamente importante imbricar los aspectos del calentamiento global con los posibles impactos hidrológicos que se esperan en el país como una forma de planificar actuaciones de mitigación y adaptación. Esto requiere aunar fuerzas y conocimiento entre profesionales del área climática y del área hidrológica, entre otros, para promover actuaciones conjuntas.

### *Actuación 4. Establecimiento de mesas de trabajo intersectoriales por cuenca*

Con el objetivo de gestionar de manera sustentable el agua y aminorar el escalamiento de situaciones de conflicto, se propone el establecimiento de mesas de trabajos intersectoriales, a nivel de cuenca. Esto permitiría conocer las interrelaciones entre los diversos actores y abrir la posibilidad de salvar situaciones críticas (en base a acuerdos voluntarios de gestión de cuencas), mientras se establece un ordenamiento basado en cuencas hidrográficas. El ordenamiento basado en cuencas debe ser coherente con la situación específica de cada sistema hidrológico en términos de sus escalas espaciales y temporales, del manejo de las fuentes de agua y de los actores o usuarios de agua de la misma.

*Actuación 5.* La cuenca debe establecerse como unidad de planificación territorial.

La unidad natural de planificación territorial debe ser la cuenca hidrográfica, medida que exige reformas legales al actual sistema; esto permitirá hacer balances restringidos a variables geográficas relacionadas con los servicios ecosistémicos de la cuenca, lo que favorece la gestión local y fortalece la sustentable distribución del recurso. Esto implica definir la aptitud productiva de las cuencas (o zonas de la cuenca) según su disponibilidad de agua, evitando por ejemplo cultivos de alto requerimiento hídrico en zonas de baja pluviometría.

*Actuación 6. Eficiencia en el uso y búsqueda de nuevas fuentes de agua como opción de futuro*

Es necesario avanzar en la eficiencia en el uso y en la búsqueda de nuevas fuentes de agua, como el reúso o las aguas lluvias urbanas y rurales, además de la desalinización. Por ende, es necesario definir incentivos que aumenten la eficiencia de uso, manteniendo la sustentabilidad de los ecosistemas. Esto implica tratar y reutilizar aguas servidas, aguas residuales de la minería y de otros procesos industriales, y destinarla a otros usos. A modo de ejemplo, en muchos países la minería se ha transformado en centrales de paso y la agricultura se abastece con aguas servidas tratadas.

### **3. PROPUESTAS ESPECÍFICAS DE TRABAJO**

#### **Eje I. Investigación, desarrollo tecnológico e innovación**

*I.a Creación de fondos público de investigación del agua*

Se deben generar fondos de investigación para estudios vinculados a los recursos hídricos a nivel regional y nacional, que satisfagan necesidades por conocimiento e innovaciones tecnológicas. Para ello, y en relación con las fuentes de financiamiento gubernamental, se plantea que a escala regional exista una porción de los fondos (Fondo de Innovación para la competitividad) para este propósito, mientras que a nivel nacional los dineros provengan de la Corporación de Fomento (CORFO) o la Agencia Nacional para la Investigación y el Desarrollo (ANID). Una entidad macro-zonal conformada por científicos y técnicos locales, definirá las temáticas más urgentes a ser abordadas,

dando especial prioridad a los estudios que tengan como meta minimizar las brechas de conocimiento entre oferta y demanda de agua.

*I.b Responsabilidad científica empresarial*

Se propone que los diferentes rubros productivos privados aporten recursos para la investigación científica y tecnológica, y para la conservación de cauces y cuerpos de agua en el corto, mediano y largo plazo. Estos aportes se derivarán conforme a una regla de proporcionalidad respecto al total de uso de agua a nivel nacional o regional. Para ello se podrán obtener recursos del impuesto al agua, además de otros aportes de carácter voluntario.

*I.c Generación de procesos efectivos de transferencia de los resultados, acceso al conocimiento y derecho a la ciencia*

Muy pocas veces los avances tecnológicos o de conocimiento logrados en proyectos de investigación son adoptados por quienes gestionan el agua. Esta falencia ha sido advertida por organismos y es así que concursos como el del Fondo de Fomento a Desarrollo Científico y Tecnológico, (FONDEF), fondos de innovación de CORFO o del Fondo de Innovación Agraria, (FIA), han trabajado en ello. Sin embargo, el proceso sigue siendo deficiente. Por esta razón, se propone generar instancias efectivas de transferencia a través de CORFO, el Ministerio de Ciencia y Tecnología, y/o una Secretaría Regional Ministerial de Recursos Hídricos, que busque las instancias para encontrar las capacidades generadas y su adecuada transferencia.

*I.d Establecimiento de redes para la investigación colaborativa*

Con el fin de evitar la duplicación de esfuerzos, el uso más efectivo de los recursos para investigación y tecnología, el favorecer la colaboración e integración entre diversos equipos científicos, el adoptar conocimientos y tecnologías internacionales exitosas y exportar avances nacionales, es que se postula incentivar la creación de redes temáticas nacionales e internacionales. Estas podrán ser generadas al alero de la Agencia de Cooperación Internacional, (AGCI), el Ministerio de Ciencia y Tecnología, Consejos científico-técnicos macro-zonales y CORFO.

*I.e Creación de Consejos científico-técnicos macrozonales*

Se plantea la implementación de un Consejo científico-técnico macro-zonal que pueda asesorar a los tomadores de decisión en materias hídricas,

permita la adopción de conocimientos y tecnologías resultantes de estudios técnicos y científicos, y defina las materias y temáticas hídricas que deben ser objeto de investigación. Este Consejo deberá ser financiado a través del royalty o impuestos aplicados a los usuarios del agua.

*I.f Generación de plataformas nacionales y regionales para captura de datos públicos y privados y procesamiento de la información*

Postulamos la generación de plataformas y redes de captura de datos hidrológicos y climáticos con asiento en DGA u otra instancia pública, que permita el acceso amplio a esa información y cubra zonas con brechas temporales y espaciales. Esta plataforma de información pública-privada deberá integrar los datos disponibles en diversas bases de datos y estaciones de monitoreo, así como procesar la información en términos estadísticos y matemáticos. Las plataformas deberán estar disponibles de manera gratuita para los tomadores de decisión, y para todas aquellas instituciones públicas y privadas que utilicen datos hidrológicos para su gestión administrativa o productiva.

*I.g Integración de conocimientos y tecnologías del mundo civil y militar*

A fin de obtener el máximo de provecho a las tecnologías y conocimientos disponibles en el país, y aplicarlos a los recursos hídricos, es que se plantea la generación de instancias de investigación y trabajo conjunto entre entes agencias militares y grupos científicos. Esta integración con fines de producción científico-tecnológica en torno al agua incluirá también la previsión de riesgos generados por aspectos climáticos (en especial hídricos), en una geopolítica de seguridad frente a desastres hidro-climáticos.

*I.h Desarrollar y validar la aplicación de modelos hidrológicos y de calidad del agua para la adecuada comprensión de las cuencas*

Si no se entiende cómo responde hidrológicamente la cuenca a las demandas de los distintos sectores productivos o escenarios de cambio climático, no se podrá gestionar el agua de forma sustentable en el territorio, ni tampoco tomar decisiones de cambios de uso del suelo. Para esto, se requiere investigación en base a una fuerte instrumentación. A partir de allí se debe buscar entender los procesos hidrológicos e hidrogeológicos en una cuenca, para posteriormente generar modelos que den cuenta de las particularidades y de las singularidades territoriales.

De esa manera se contará con herramientas potentes coadyuvadoras de una gestión sustentable. El desarrollo de modelos continentales, regionales o locales para informar una adecuada gestión de las fuentes de agua deberá ser una actividad prioritaria durante el corto y mediano plazo. Esto permitirá definir esquemas de gestión sustentable del agua basados en escenarios de cambio climático, cambio del uso de suelo, crecimiento poblacional y aumento de las demandas, entre otros.

Eje II. Propuestas relativas a los sectores productivos

*II.a Establecimiento de valores críticos de gestión hídrica sectorial*

Se considera pertinente postular la determinación de puntos críticos para los distintos sectores productivos usuarios de agua, en lo que respecta a la relación o cruce entre la oferta y la demanda; eficiencia en el uso del agua; desequilibrios hídricos; y pérdidas de agua (Minería, Agricultura, Forestal, Sanitario, Energía, entre otros).

*II.b Desarrollo del catastro unitario de uso de agua sectorial*

Dado que es imperativo que los volúmenes de agua superficial y subterránea sean considerados de manera integrada, es que se plantea desarrollar catastros específicos de uso del agua superficial y subterránea para cada sector productivo, para lo cual la DGA deberá ser dotada de nuevos roles en términos de conocer las ofertas y demandas.

*II.c Cuantificación del consumo por Ley del medidor*

En concordancia con las medidas recomendadas, se estima necesario el establecimiento y adopción de normas de eficiencia en el uso del agua, en particular conocer con detalle cuánta agua gasta cada usuario, lo cual es muy relevante en los altos consumos, como es la agricultura. Esto permitirá establecer criterios de eficiencia y eficacia en el uso del agua, de tal forma de poder generar protocolos de gestión hídrica sectoriales y por localidad. Para ello, es sumamente necesario establecer una estrategia detallada para el control y monitoreo de extracciones de agua en Chile.

*II.d Consumo y autofiscalización*

Con el respaldo de la “ley del medidor”, se propone que cada sector productivo emita informes sobre sus consumos y la eficiencia de uso del agua en sus diversos procesos. Estos informes serán evaluados por la autoridad respectiva y evitarán en parte la

falencia en fiscalizaciones por parte de servicios públicos debido a falta de presupuesto y personal.

### *II.e Los incentivos al riego deben considerar los desequilibrios hidrológicos que se generan*

Las políticas de incentivo a la eficiencia del riego deben considerar los potenciales efectos en el funcionamiento de la cuenca como un todo, evitando una mirada parcial desde el punto de vista de la disponibilidad de agua de riego que deja de lado los flujos de retorno para la cuenca. Al ser los ríos sistemas abiertos que forman parte integral del paisaje que los rodea, toda nueva obra en ellos debe considerar esta interacción. Asimismo, estos subsidios deben poseer una mirada redistributiva, que contemple acciones preferenciales para pequeños propietarios y productores agrícolas, así como acompañamiento técnico para su gestión.

## Eje III. Propuestas en el marco institucional

### *III.a Fortalecimiento institucional del Estado en la gestión del agua (Subsecretaría del agua)*

Se debe fortalecer y perfeccionar la institucionalidad encargada del agua en el país, para lo cual se acoge la idea de crear una “Subsecretaría de Recursos Hídricos”, dependiente del Ministerio de Obras Públicas, idea ya planteada hace más de una década por gobiernos anteriores y estudios recientes (Valdés-Pineda *et al.*, 2014). Esta Subsecretaría deberá mejorar la gobernanza del agua a nivel país actuando como un ente rector con liderazgo efectivo sobre el tema, capaz de evitar la dispersión institucional, habilitado para formular y coordinar las políticas públicas y la planificación estratégica del sector, la cual deberá ser complementada con órganos representativos de los ministerios con interés en el tema, como también con representantes del sector privado.

### *III.b Creación de los Consejos de Recursos Hídricos (CRH), sea a nivel de cuencas o de regiones*

Esta instancia con participación pública y privada debe ser representativa de los beneficiarios e interesados (no solo de titulares de Derechos de Aprovechamiento de Aguas, DAA) de la cuenca o región, con capacidad para generar y promover una visión integrada y sustentable de mediano y largo plazo de la gestión del agua y desarrollar las coordinaciones necesarias.

### *III.c Fortalecer y relevar el rol de las Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA)*

Estas organizaciones privadas, que tienen como función principal la gestión y distribución de las aguas en las fuentes naturales (superficiales y subterráneas) y canales, deben ser apoyadas y fortalecidas, ya que ejercen un rol eminentemente público. Ellas tienen una larga tradición en la historia nacional y sin lugar a duda pueden colaborar de forma muy importante en la gestión eficiente y social del recurso hídrico. Es importante mejorar sus atribuciones técnicas y legales, al igual que los mecanismos de control y fiscalización por parte del Estado y los propios usuarios.

### *III.d Creación de programas de incentivos e inversión para familias sin acceso al agua*

El sector rural necesita imperiosamente satisfacer las demandas no satisfechas de agua para uso doméstico y ello implica terminar o reducir drásticamente el abastecimiento por camiones aljibes. Existen las tecnologías sustentables para abordar esta problemática y ello implica la instalación de sistemas de captación de aguas lluvia en zonas rurales, así como la recarga de acuíferos para mantener la oferta de pozos, o la necesidad de establecer prioridades claras que aseguren el abastecimiento humano. Por tanto, esta es una inversión necesaria para asegurar la dignidad del mundo rural, que implica una ampliación y modernización de los sistemas de agua potable rural.

### *III.e Implementación del Plan Nacional de Recursos Hídricos*

Es necesario concretar un plan nacional de actuación en recursos hídricos, con la participación de instituciones públicas y privadas para definir roles y alcances en el manejo del recurso hídrico. Este plan debe contener medidas concretas y financiamiento real. Debe avanzarse en I+D que entregue información y conocimiento; seguido de una definición y concreción de políticas públicas; con un establecimiento de metas estratégicas y operativas, incluyendo infraestructura para la desalinización, recarga de acuíferos y utilización de aguas grises y servidas, entre otros aspectos.

## Eje IV. Propuestas para nuevas normativas (constitución, leyes, reglamentos, etc.)

Derivado que Chile se encuentra, por medio de una convención constituyente, escribiendo una nueva

constitución, se proponen tres elementos básicos que esta debería contener con respecto a los recursos hídricos.

#### *IV.a Todas las aguas son Bienes Nacionales de Uso Público*

La nueva Constitución debe establecer con toda claridad que las aguas, todas ellas, sean superficiales o subterráneas, son bienes del dominio público (en el lenguaje del Código Civil: Bienes Nacionales de Uso Público), esto es, que pertenecen a todos los chilenos y su uso debe propender al interés general.

#### *IV.b Toda persona tiene el derecho humano de acceso al agua potable y al saneamiento*

La Constitución debe recoger las disposiciones del derecho internacional de los derechos humanos, recientemente reconocidas por la Corte Suprema, y establecer que toda persona tiene el derecho humano de acceso al agua potable y al saneamiento, en condiciones de igualdad y no discriminación, y es deber del Estado garantizarlo.

#### *IV.c Es necesario establecer en qué condiciones se puede hacer uso privativo del agua*

La Constitución debe entregar a la ley la regulación respecto de cómo y en qué condiciones los particulares podrán hacer uso del agua en forma privativa. Estos aprovechamientos deben estar orientados al interés general y ambiental, y deben mantenerse mientras las aguas sean utilizadas.

### Eje V. Propuestas para medio ambiente, agua y sociedad

#### *V.a Establecer regulaciones de disposición de las aguas usadas en agricultura*

Actualmente no existe una normativa clara que tienda a controlar la forma y estado en que las aguas empleadas en agricultura y ganadería deban ser dispuestas tras su uso. Estas, llamadas comúnmente como fuentes no puntuales o difusas, se vinculan de manera directa a la posibilidad de eutroficación de cursos y cuerpos de agua. Por ello, se plantea el establecimiento de regulaciones efectivas para la disposición del agua en la agricultura y ganadería, que incluya análisis previos a la instalación de la actividad, así como controles efectivos posteriores.

#### *V.b Los ecosistemas naturales son vitales para asegurar la producción de agua*

Se debe relevar el rol de los ecosistemas naturales en la generación de la cantidad y calidad del agua, junto con avanzar en **soluciones basadas en la naturaleza**,

como protección de humedales, gestión de bosques naturales, tratamientos en cabeceras de cuencas o zonas de recarga, y otros, sumado a actividades de restauración de ecosistemas degradados. Lo anterior se podría lograr creando incentivos económicos, como, por ejemplo, sistemas de pago por servicios ecosistémicos.

#### *V.c Generar una mayor protección de la contaminación de los cuerpos de agua*

Se propone reformar la actual definición legal de “contaminación” que existe en la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, pues ella exige siempre superación de una norma y, por tanto, al no existir la norma, no se produce contaminación. Se sugiere utilizar una definición como la indicada en la Directiva 2000/60/CE. Además, se propone generar un programa que acelere la dictación de normas secundaria de calidad para los ríos y cuerpos de agua de Chile.

#### *V.d Establecer un nuevo modelo ambiental de creación de embalses*

Se recomienda revisar la política pública que promueve la creación de embalses. Una obra de embalse de aguas debería diseñarse de manera que permita pulsos de lavado de riberas y también el tránsito intermitente de los sedimentos, para no modificar de manera sustancial el flujo y el ecosistema del río. Si es que se decide construir nuevos embalses se deberían localizar de manera estratégica en la red hidrográfica, de manera de contribuir a la recarga artificial de acuíferos en un marco de operación conjunta agua superficial-subterránea.

#### *V.e Protección eficiente a los glaciares*

Es imperativo generar una protección legal de los glaciares, ya que actúan como diques reguladores de los caudales andinos (ganan masa en los años fríos y húmedos y la pierden en años secos y cálidos, cuando la oferta de la nieve precipitada en el invierno no alcanza a satisfacer la demanda hídrica), y son reguladores térmicos de los ecosistemas. Ello por sí solo demanda un cuidado especial de estas zonas, lo que debe ser resuelto en base a actividades concretas y efectivas.

#### *V.f Establecer normas claras referidas a derechos de aprovechamiento en aguas recargadas y en el reuso*

Es necesario avanzar en la regulación referida a la recarga artificial de aguas subterráneas y a la reutilización de las aguas tratadas respecto a los

siguientes temas: cómo y quiénes administran el agua tratada, recargada o almacenada; si se crean derechos de agua para ellos; cuál es el volumen máximo de agua a extraer; o en caso de que se infiltre agua, dónde, cuándo, cuánto y cómo se puede extraer.

*V.g Incorporar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) proyectos hídricos de gran tamaño que pueden involucrar daños ambientales severos*

Es necesario legislar de manera que proyectos como la recarga artificial de acuíferos de grandes dimensiones o los programas de riego tecnificado, sean evaluados ambientalmente. Además, es necesario incorporar la evaluación de proyectos que provocan contaminación por fuentes difusas en el SEIA.

*V.h Protección de las zonas de recarga natural de acuíferos*

Es necesario proteger legalmente las zonas naturales de captación de aguas subterráneas, siguiendo estándares internacionales con fines de protección de calidad, derivado de la importancia creciente de estas aguas en el uso y sustentabilidad ambiental de los ecosistemas. Y ello es particularmente importante en un país como Chile, con clima mayoritariamente mediterráneo y en donde las precipitaciones caen en invierno, periodo en el cual se debe propiciar dicha recarga.

## Eje VI. Propuestas en educación y capacitación

*VI.a Solución de conflictos por el agua en base a métodos de gestión estratégica*

Existen diversas metodologías eficientes que bien aplicadas permiten alcanzar acuerdos entre las partes. Estas, deberían ser aplicadas por instituciones neutrales como universidades, cátedras Unesco, instituciones afines, etc., que, mediante acuerdos previos, podrían evitar una judicialización de los conflictos, en una forma de intermediación efectiva y previa. La idea es que, a partir de estas aplicaciones, sea posible alcanzar acuerdos que aseguren la resolución de conflictos.

*VI.b Creación y fortalecimiento de programas de pre y postgrado en hidrología*

Como lo ha recomendado Unesco, es muy importante para la adecuada gestión de los recursos hídricos, el contar con profesionales debidamente formados. Para ello es necesario entregar las herramientas a los profesionales encargados de la gestión del agua y ello

implica la creación de programas de pre y postgrado en hidrología y gestión de recursos hídricos. Por ende, es fundamental formar hidrólogos en Chile y su contratación dentro de las instituciones involucradas con la gestión del agua, incluyendo instituciones públicas y privadas, como por ejemplo, los municipios.

*VI.c Expansión y fortalecimiento de programas de capacitación a nivel de usuarios*

Así como es necesario fortalecer las capacidades profesionales, es también necesario incrementar las capacidades a nivel de usuarios y específicamente de las organizaciones de usuarios de aguas, OUA. Ellas necesitan ser parte del proceso para alcanzar una mejor gestión del agua y eso pasa por instrumentar cauces y canales, saber capturar esa información y mantener el instrumental, automatizar procesos a distancia y manejar los desarrollos tecnológicos, además de ser capaces de generar innovaciones, entre otros aspectos. Esto asegurará desde la base una mejor gestión de los recursos hídricos.

*VI.d Desarrollar la cultura de cuidado del agua en todos los ámbitos: urbano, rural, niños, adultos, autoridades, usuarios*

Siendo el agua el principal recurso natural de Chile, se impone la necesidad de relevar esta importancia, con el fin que la población posea una cultura de cuidado del agua. Por ello se plantea la creación de programas de educación para el uso sustentable y cuidado del agua. Esto aplica no sólo a escuelas, sino además a universidades, a empresas, a instituciones públicas, etc. Una población que cuida su agua es fundamental para minimizar el consumo de todo tipo y en Chile hoy no existe una cultura de cuidado del agua.

*VI.e Liderazgo de mujeres para potenciar comunidades*

Los desastres pueden exacerbar la desigualdad de género existente en la participación política, la toma de decisiones y el acceso a recursos e información. Las mujeres y las niñas son más vulnerables y están más expuestas a los desastres. Es necesario promover y evaluar la contribución real y potencial de las mujeres a la reducción del riesgo de desastres, incluido su papel de liderazgo como socorristas y su papel central en la resiliencia comunitaria. También debe reconocerse su actividad en las estrategias de resiliencia, recuperación y reconstrucción. Se ha demostrado que aprovechar el liderazgo, la experiencia y los conocimientos de las mujeres en

estos esfuerzos conduce a iniciativas más eficaces. Por otro lado, es imperativo recopilar datos desglosados por género, edad y discapacidad. Esta acción permitirá la creación de programas dirigidos a las mujeres como líderes en los campos de la reconstrucción, la reducción de riesgos y la construcción de la paz. Existe una necesidad urgente de invertir en programas de resiliencia que tengan en cuenta el género, la edad y la diversidad.

## Eje VII. Propuestas referidas al cambio climático

### *VII.a Caracterización espacio-temporal del Cambio Climático*

Las precipitaciones extremas tienden a ser más intensas y frecuentes en los futuros escenarios de calentamiento, especialmente bajo el escenario de altas emisiones, así como se espera un aumento en la recurrencia de las sequías. Este escenario demanda caracterizar las formas en que tomará lugar el cambio climático para las diversas áreas del territorio. Esto implica conocer escenarios posibles y cómo estos deberán ser abordados a nivel local, regional, nacional e internacional y a nivel de los ecosistemas. Se debe acompañar este proceso con una política estratégica y corporativa sobre el cambio climático (Balica y Wright, 2009). En este marco es importante el incluir las áreas protegidas para proporcionar la planificación y la gestión adecuadas. Como acciones primarias se debe contar con la metodología básica para construir atlas de riesgo (cartografía digital) de las zonas de vulnerabilidad y peligro. Asimismo las autoridades en coordinación con la comunidad científica, deben garantizar los mecanismos para obtener rápidamente información sobre zonas potencialmente inundables, la profundidad y tiempo de las inundaciones recurrentes de la región, así como las sequías, entre otros aspectos.

### *VII.b Metodologías para evaluar el impacto de los fenómenos extremos (riesgo multi-amenaza, impactos sociales, político, de salud y ecológico)*

Se debe considerar que todas las metodologías de evaluación de riesgos, son instrumentos de gestión y de comunicación, tanto para riesgos objetivos, como para los subjetivos. La parte metodológica para evaluar el riesgo es una de las actividades fundamentales y ello requiere de foros regionales de participación interdisciplinaria. Como ya se comentó, se espera que el aumento de las precipitaciones extremas o de las sequías, definan pérdidas de cultivos y reducciones de la productividad, con una

disminución de la oferta de alimentos, entre otros impactos. En este marco es imperativo evaluar de forma macro-zonal y en base a metodologías de consenso el impacto de los fenómenos extremos, con un enfoque de riesgo multi-amenaza, considerando además los impactos sociales, políticos, de salud y ecológicos.

### *VII.c Establecer estrategias de adaptación a condiciones de menor oferta de agua por variabilidad y cambio climático, incluyendo financiamiento*

Existen diversos procesos de modelación que han definido la existencia de una alta probabilidad de reducción de la oferta de lluvias en el futuro, para diversos ecosistemas del país. Dado este escenario de incertidumbre, ligado a sequías y a una menor oferta de agua, es preciso definir e implementar estrategias de mitigación y adaptación que promuevan menores consumos de agua, una muy alta eficiencia y un conocimiento científico sobre la real capacidad de las cuencas. Ello, para satisfacer demandas en escenarios críticos de reducción de la oferta de agua.

### *VII.d Establecer estrategias de actuación para enfrentar una mayor recurrencia de eventos extremos*

Ante una mayor ocurrencia de caudales de crecidas, inundaciones, sequías y movimientos de masa, es necesario mejorar la gestión del territorio. Para ello se propone definir e implementar diversas estrategias, como por ejemplo establecer un mapa de riesgo de ocurrencia de eventos extremos que permita jerarquizar zonas según los potenciales impactos negativos y aplicar métodos científicos que den cuenta de tales riesgos y prevengan la pérdida de vidas humanas y bienes económicos y ambientales.

### *VII.e Resiliencia socio ambiental*

Es necesario proponer acciones de resiliencia ligadas a los recursos hídricos, encaminadas a toda la población vulnerable. En este contexto se deben desarrollar Planes de Acción para organizar comunidades durante el tiempo de respuesta a los desastres y la resiliencia de una comunidad regional o local. Se deben homologar metodologías que permitan identificar los factores de alta prevalencia que afectan la respuesta individual y colectiva de grupos vulnerables. Para conocer la realidad de la condición resiliente de una comunidad, deben aplicarse diversas metodologías validadas en diversos marcos científicos (Gutiérrez-Lopez *et al.*, 2019). La aplicación de un factor de resiliencia permite planificar acciones en materia de: atención inmediata:

rescate, evacuación y asistencia de emergencia; restablecimiento de los servicios básicos y garantía de abastecimiento, así como obtener toda la

información necesaria que facilite el proceso de reconstrucción de una comunidad.

## REFERENCIAS

- Balica, S. and Wright, N. G. (2009), A network of knowledge on applying an indicator-based methodology for minimizing flood vulnerability. *Hydrological Processes* (23): 2983–2986. doi:10.1002/hyp.7424
- Banco Mundial. (2011). Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. (en línea). Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/452181468216298391/pdf/633920ESW0SPAN0le0GRH0final0DR0REV-0doc.pdf>
- Banco Mundial. (2013). Chile: Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua. (en línea). Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/sad/ADM5439.pdf>
- Bellisario, A., Ferrando, F., & Janke, J. (2013). Water resources in Chile: the critical relation between glaciers and mining for sustainable water management. *Investigaciones Geográficas*, 46, 3-24.
- Carrasco, J., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0° C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 933-948. Doi: 10.1623/hysj.2005.50.6.933.
- Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2). (2015). Informe a la nación la megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. (en línea). Disponible en: <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>
- Correa, G., & Muñoz, A. (2015). Agua, pobreza y equidad: un análisis asimétrico. *Revista Latinoamericana de Bioética*, 28, 90-99.
- Costa, E. (2016). Diagnóstico para un cambio: los dilemas de la regulación de las aguas en Chile. *Revista Chilena de Derecho*, 43, 335-354.
- García, R. (2020). La compatibilidad del derecho humano al agua con la legislación chilena: reconocimiento latinoamericano de este derecho. *Lus et praxis*, 26, 172-194.
- Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6307-6327. Doi:10.5194/hess-21-6307-2017
- Gutiérrez-Lopez, A., Donoso, M., May, Z., Bravo-Orduña, G. (2019). A Meteo-Epidemiological Vulnerability Index as a resilience factor for the principal regions in Haiti. *Journal of Hydrology*, 569, 135-141. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.11.063
- Henríquez, C., Aspee, N., & Quense, J. (2016). Zonas de catástrofe por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgo climático. *Revista de geografía del Norte Grande*, 63, 27-44.
- Herrera, M., Candia, C., Rivera, D., Aitken, D., Brieba, D., Boettiger, C., Donoso, G., & Godoy, A. (2019). Understanding water disputes in Chile with text and data mining tools. *Water International*, 44, 302-320. Doi: 10.1080/02508060.2019.1599774
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (en línea). Disponible en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf)
- Larraín, S. (2006). El Agua en Chile: entre los derechos humanos y las reglas del mercado. *Polis*, 5, 1-18

- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE*, 27 (81). Doi: 10.4067/S0250-71612001008100006
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2021). Escasez Hídrica en Chile: desafíos pendientes. Apuntes para un desarrollo sostenible N°1. (en línea). Disponible en: <https://chile.un.org/es/105929-escasez-hidrica-en-chile-desafios-pendientes>
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 25, 1-22.
- UNESCO. (1987). The role of water in socio-economic development, ed. Publisher: IHP-II, France. ISBN: 92-3-102534-1
- UNESCO. (2019). Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile. Unesco Office Montevideo and regional bureau for science in Latin America and the Caribbean, Uruguay.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1982. Agua, vida y desarrollo. Volumen 1. Oficina Regional de Montevideo. Uruguay.
- Valdés, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519(27), 2538-2567- Doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.016.
- Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y Sociedad*, 8, 35-71.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



## Characterization of hydrogeological dynamics through summer runoff analysis and runoff hydrograph separation in two watersheds of Chiloé, Chile

*Caracterización de la Dinámica Hidrogeológica Mediante el Análisis de la Escorrentía Estival y la Descomposición del Hidrograma de Escorrentía en dos Cuencas de Chiloé*

Daniel Paez<sup>1,3</sup>, Jose Luis Arumi\*<sup>2,3</sup>, Jerónimo Paredes<sup>2</sup>

Recibido: 30/09/2021

Aceptado: 08/10/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

La isla de Chiloé está sufriendo escasez estacional de agua superficial que aumenta la demanda de agua subterránea. Estudiamos la interacción entre la escorrentía superficial y subterránea en dos cuencas que disponen de estaciones de aforo en los ríos Vilcún y San Pedro. Los datos de escorrentía se analizaron mediante análisis de frecuencia; el uso de indicadores para determinar la contribución de la descarga de las aguas subterráneas al río; y tres técnicas de separación de flujo base, para estimar la recarga de aguas subterráneas. Los resultados fueron consistentes en indicar que la cuenca del río Vilcún presenta una mayor dependencia de los aportes de agua subterránea para sostener la escorrentía (54% y 65%) en comparación con la cuenca del río Grande (34% y 46%). En cuanto a la recarga media anual, para la cuenca del río Vilcún se estimó entre 5,9 y 6,4 m<sup>3</sup>/s, lo que representa un rango de 47 a 51% de la escorrentía total; y para el río Grande entre 6,6 y 9,8 m<sup>3</sup>/s, lo que representa un rango de 25 a 37% de la escorrentía total. Ambas cuencas cuentan con almacenamiento de agua subterránea que permite una escorrentía continua a pesar de sus esperadas diferencias hidrogeológicas. Se anticipa que el uso intenso de aguas subterráneas u otra alteración de factores que modifican el almacenamiento de aguas subterráneas en las cuencas hidrográficas estudiadas conducirán a cambios significativos en los regímenes hidrológicos de estos dos ríos de la isla de Chiloé.

**Palabras clave:** Descarga subterránea, flujo base, análisis de frecuencia, escasez hídrica estival

### Abstract

Chiloé Island had evidenced seasonal surface water scarcity that increasingly demand groundwater. We study the interaction between surface and groundwater flows using river runoff data available from the two gauging station existents at the island at the Vilcún and San Pedro rivers. The runoff data were analyzed using frequency analysis consisted of the graphic comparison of the flow duration curve; the use of indicators to determine the contribution of streamflow groundwater discharge to the river; and three baseflow separation techniques, through which the baseflow index was calculated for the annual and summer periods, while annual baseflow volume was quantified as a method of approximating groundwater recharge. Results were consistent in indicating that the Vilcún River watershed presents greater dependence on groundwater inputs to sustain runoff (54% and 65%) compared to the Grande River watershed (34% and 46%). Regarding the mean annual recharge, for the Vilcún River watershed was estimated between 5.9 and 6.4 m<sup>3</sup>/s, which represents a range of 47 to 51% of total runoff; and for the Grande River between 6.6 and 9.8 m<sup>3</sup>/s, which represents a range of 25 to 37 %, of total runoff. Both watersheds have groundwater storage that permits continuous runoff despite their expected hydrogeological differences. It is anticipated that intense use of groundwater or another alteration of factors that modify groundwater storage in the studied watersheds will lead to significant changes in the hydrological regimes of these two rivers of Chiloé Island.

**Keywords:** Groundwater discharge, base-flow, frequency analysis, summer water scarcity

- 1 Master program of Agricultural Engineering; Water Resources Department, Faculty of Agricultural Engineering, Universidad de Concepción. Chillan, Chile. dpaezz@gmail.com
- 2 Water Resources Department, Faculty of Agricultural Engineering, Universidad de Concepción. Chillan, Chile, jarumi@udec.cl, jparedes@udec.cl
- 3 CHRIAM Water Center Universidad de Concepción. Chillan, Chile

## 1. INTRODUCTION

South-central Chile is in the midst of a drought that has lasted 12 years (Garreaud et al., 2017; CR2, 2018) and resulted in a significant transformation of the territory, as agriculture, which is the main economic activity of the area, is progressively adapting to the persistent lack of rain through a transformation of its production patterns, for which it has had to incorporate irrigation using groundwater, since there is no canal infrastructure and it is more economical for producers to construct deep wells.

It is expected that this increase in groundwater extraction will alter the water balance of aquifers and river systems with which they are connected. In decreasing precipitation conditions, (climate change scenario) the decrease in natural recharge along with an increase in extractions will produce a decrease in the discharges that feed rivers and groundwater-dependent ecosystems, resulting in a decrease in dilution flows during summer and conflicts over multiple competing water uses (drinking water, industrial, energy and tourism purposes, among others).

Because this area was always characterized by its abundant precipitation and watercourses with continuous runoff, there is no detailed hydrological or hydrogeological information to define the components of the water balance. Thus, it is necessary to develop methodological approaches that allow information on the characteristics of the hydrogeological dynamics of the study area to be obtained.

Methods of studying water resources based on the determination of water balance components require an extensive infrastructure for capturing meteorological and hydrogeological data, which must be associated with a recording period that is extensive and equivalent among all involved variables. In addition, the methods used in the runoff analysis are based on measurements reflecting all gain and loss processes at the watercourse monitoring point (Lastoria, 2008, Kirchner, 2009), reflecting the interaction of complex surface runoff, subsurface flow and groundwater flow processes (Balek, 1989).

Some of the most common methods that allow the relationship between groundwater storage in a watershed and runoff to be addressed are stream flow frequency analysis and hydrograph separation (Brodie and Hostetler, 2005).

Frequency analysis is carried out by creating a flow distribution curve (FDC), which consists of a graphic relationship between stream flow magnitude and the frequency with which each recorded stream flow is exceeded. It is considered an important tool for describing the behavior and variability of river runoff, as it is an indicator of the hydrogeological characteristics of a watershed (Smathkin, 2001; WMO, 2009). The portion of the FDC that specifically represents low-flow stream flows can be set arbitrarily between exceedance probabilities of 50 to 100 %. Curves with a gentle slope in this section indicate a significant contribution from groundwater storage to watercourse runoff, while pronounced slopes indicate greater daily discharge (Q) variability and typically correspond to watersheds with impermeable lithographic substrate, with low storage and a rapid precipitation response (WMO, 2009).

Based on the characteristics of the FDC, various authors have proposed indicators that relate difference exceedance stream flows in order to characterize groundwater contribution to surface runoff, including those that stress the Q90/Q50 relationships mentioned in Smathkin (2001) and the  $([Q25/Q75]^{1/2})$  relationship of Walton (1965). The latter has been used extensively to characterize watersheds in wet climates of Canada (Singer and Cheng, 2002; MNRF-Ontario CA., 2014).

According to Smathkin (2001), analysis using FDC can be applied to various time periods, for example, for runoff observed only in the summer period or in a specific month. In addition, various specific exceedance indicators are typically used to define regulatory conditions or establish baseline environmental conditions.

Hydrograph separation methods are based on the classical definitions of runoff generation described by Horton (1933) and were refined and spread over the course of the twentieth century in works such as those Linsley et al. (1958; 1982) and Toebe and Ourivev (1970). They have been used both to determine the proportion of groundwater contribution to sustaining watercourse runoff flows through the determination of the base flow index (BFI) (Institute of Hydrology, 1980; Smathkin, 2001, WMO, 2009) and to obtain a first approximation of groundwater storage recharge (Fetter, 1994; Rutledge, 1998; Brodie and Hostetler, 2005; Lee et al., 2006).

Nowadays manual hydrograph separation processes have been replaced by automatic analysis using

digital processors, which allow both fast processing of a large amount of data and decreases in inconsistencies caused by subjective valuation of the process (Sloto and Crouse, 1996)

Based on the aforementioned methods and availability of daily runoff data from public stations, this work aims to contribute to the knowledge of hydrological system functioning on Chiloé Island through the application of a streamflow data analysis method to allow the importance of groundwater storage and its relationship with flow maintenance during the low-flow season to be understood and the potential recharge of these hydrogeological systems to be estimated.

## **2. CASE STUDY**

Due to the drought that has persisted since 2007, there have been increasing difficulties supplying the population with water, mainly in rural areas. This situation has resulted in the implementation of palliative measures such as communal emergency plans to supply the population, with reaches and costs that have increased over time (Mallén, 2015), as well as recent decrees that have declared the Quemchi and Quellón provinces to be a water scarcity zone in 2017 (MOP, 2017). In the document “Water resources strategy of the Chiloé Province” (Gobernación Provincial de Chiloé, 2015) the phenomenon was identified as a seasonal water shortage problem that is having social and environmental effects.

From a water availability perspective, one of the most determining factors of the vulnerability of Chiloé is its island status and lack of connection with the Andes Mountains, which has a bearing on the lack of winter snow reserves. Thus, the only means of support for both surface runoff and aquifer recharge is rainfall (DGA, 2016). In addition, the forecast for water demand in Chiloé indicates a significant increase in water consumption for energy production from surface sources and industry from underground sources (DGA, 2007).

Despite the identified effects, there have been no indications of a push for initiatives that involve a comprehensive assessment of water resources knowledge in order to predict behavior and possible effects on the water supply if water from some sources or in specific locations of the territory is overused. The scarcity and low quality of hydrological information is another major barrier to

establishing a correct assessment and forecast of water availability on the island (DGA; 2014).

### *2.1 General characteristics of the territory.*

Chiloé Island has an area of approximately 8,400 km<sup>2</sup> and is located in the south of Chile, between parallels 41° and 43° South (Figure 1). In administrative terms, it is part of the Los Lagos Region, and, along with the other islands of the archipelago, makes up the Chiloé Province.

The relief of the island comprises two large domains: along the western side of the island, the Coastal Range, a mountain range with a north-south orientation, which reaches a maximum height of 890 m.a.s.l. and is up to 30 km wide along its east-west axis; and a system of plains and hills that are distributed all along the Eastern side of the island, at altitudes that vary between 0 and 250 m.a.s.l., which belongs to the marine or fluviomarine plain domain (Borgel, 1983).

The climate of Chiloé is temperate-rainy without a dry season and characterized by low daily and annual thermal amplitude and precipitation distributed throughout the year (Errazuriz et al., 1998), although with moderate seasonal behavior (Figure 2; Valdez, 2009; Juliá & Carmona, 2011). The driest month is February, in which between 3 and 6% of annual precipitation occurs, while 19% of annual precipitation is concentrated in the December-March quarter. The precipitation rate varies locally due to the orographic forcing exerted by the Coastal Range (Fuenzalida, 1982; in Figueroa, 2014), with values that reach an annual average close to 2000 mm/year in the lowest parts of the island, and over 4000 mm/year in the highest parts of the Coastal Range (DGA, 1988). The geology of the study area is composed of metamorphic rocks of the Paleozoic-Triassic Age and sedimentary deposits of the Pleistocene-Holocene. The metamorphic rocks are distributed along the western side of the island and make up the highest parts of the Coastal Range. Their dominant lithology consists of schists, metasandstones and metacherts that are characterized by low permeability; thus, they do not constitute significant aquifers (Troncoso et al., 2008; Paez et al., 2015). The unconsolidated sedimentary deposits are associated with the last glacial periods (mainly Llanquihue glaciation and Santa María glaciation) that affected this part of the territory during the Pleistocene-Holocene, and are distributed throughout the center and Eastern edge of the island (Duhart et al., 2000). They comprise a variety of interbedded

lithological facies, which range from glaciofluvial sand and gravel deposits to fine sands and clays of glaciolacustrine facies. Therefore, they constitute free to confined aquifers with large sizes that are the island's main sources of groundwater. The

transmissivity of this unit varies between 50 and 750 m/day, and its static level is highly variable, depending on the local hydrostratigraphic conditions (Troncoso et al., 2008; Páez et al., 2015).

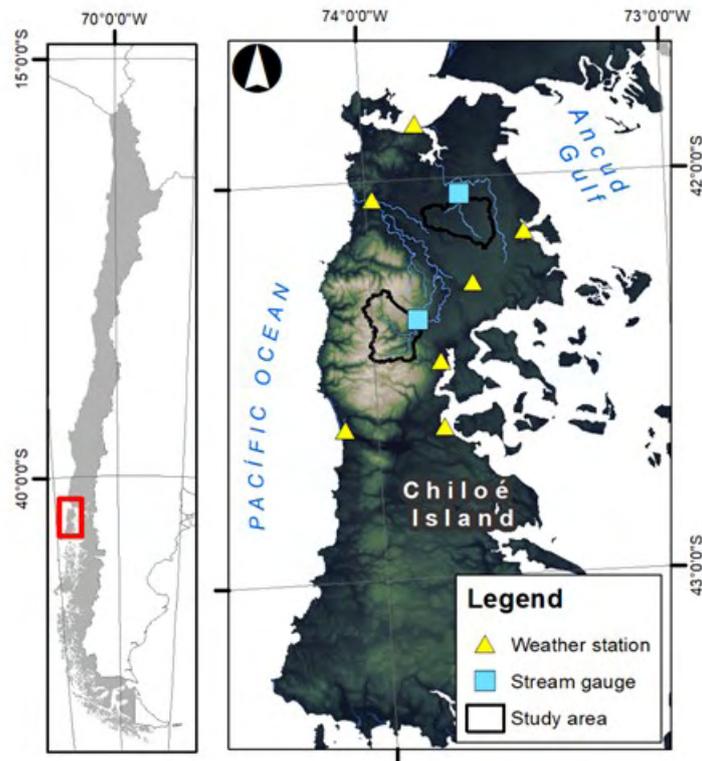


Figure 1. Study area location

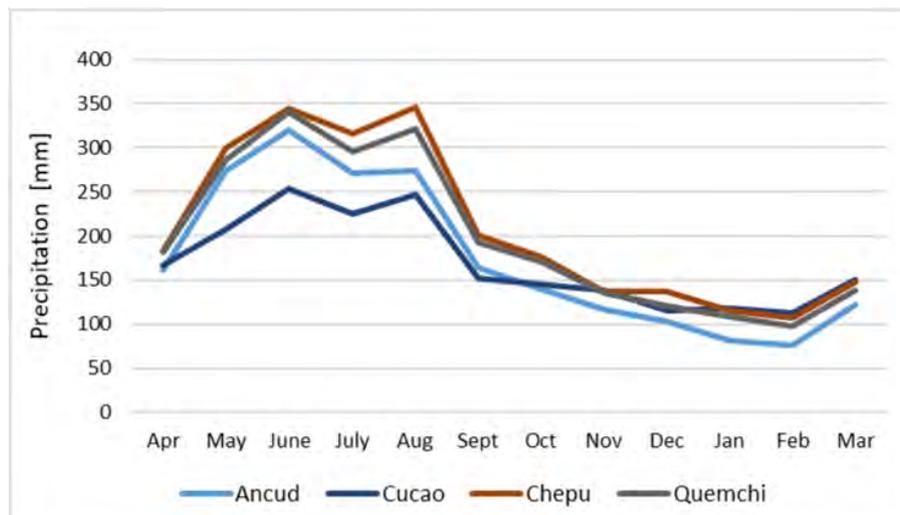


Figure 2. Monthly precipitation hydrographs for the selected stations in the study area

## 2.2 Analyzed watersheds

On Chiloé Island there are only two watersheds with stream flow records maintained by the General Water Directorate (DGA): the Vilcún River watershed, with the Vilcún River at Bel Ben stream flow monitoring station, and the Grande River watershed, with the Grande River at San Pedro station. Both stations define sub-watersheds, the main morphometric characteristics of which are shown in Table 1.

The reliefs of the two watersheds are very different, which is highlighted by the contrast presented by the hypsometric curves in Figure 3, which shows the greater altimetric difference in the watershed of the Grande River, the headwaters of which are located at an elevation considerably higher than the Vilcún River watershed. The geological characteristics of the two watersheds also contrast. While in the Vilcún

River watershed the geology is completely composed of permeable semi-consolidated sedimentary deposits, mainly of glacio-fluvial and morainic origin (Pleistocene-Holocene), more than 90% of the Grande River watershed is made up of metamorphic rocks (Carboniferous-Permian), which have been described as hydrogeological units with low to no groundwater potential due to their low permeability (Troncoso et al, 2008; Páez et al., 2008). A small fraction of this latter watershed is composed of sedimentary material similar to those described above and current Grande River fluvial deposits. Using the precipitation isohyets from the DGA (1987), which were complemented by the records of Juliá and Carmona (2011), the average annual precipitation in each watershed was calculated, with values of 4131 mm/year in the Grande River watershed 2294 mm/year in the Vilcún River watershed.

Table 1. Main morphometric characteristics of the studied watersheds

Variable	Vilcún River watershed	Grande River watershed
Area [km <sup>2</sup> ]	176.7	203.8
Average height [m]	108	473
Maximum height [m]	207	857
Minimum height [m]	21	80
Average slope [°]	4	15
Maximum slope [°]	33	61

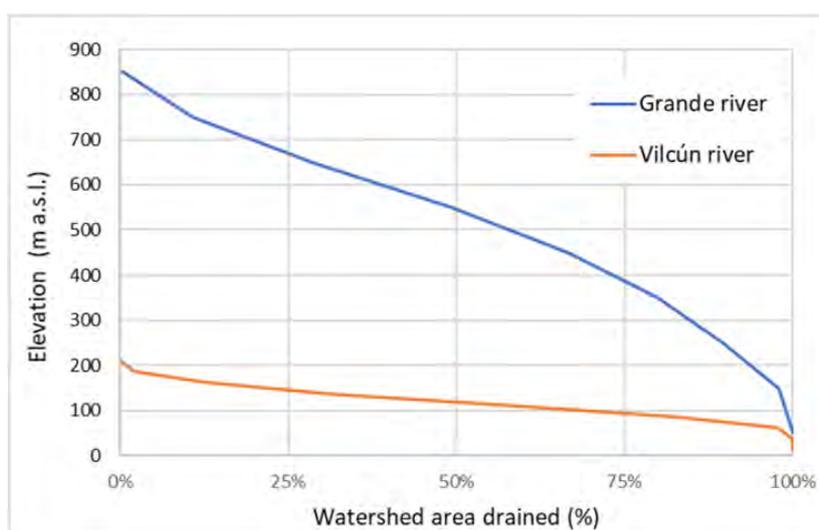


Figure 3. Hypsometric curve of the watersheds defined by the Vilcún River at Bel Ben and Grande River at San Pedro streamflow monitoring stations.

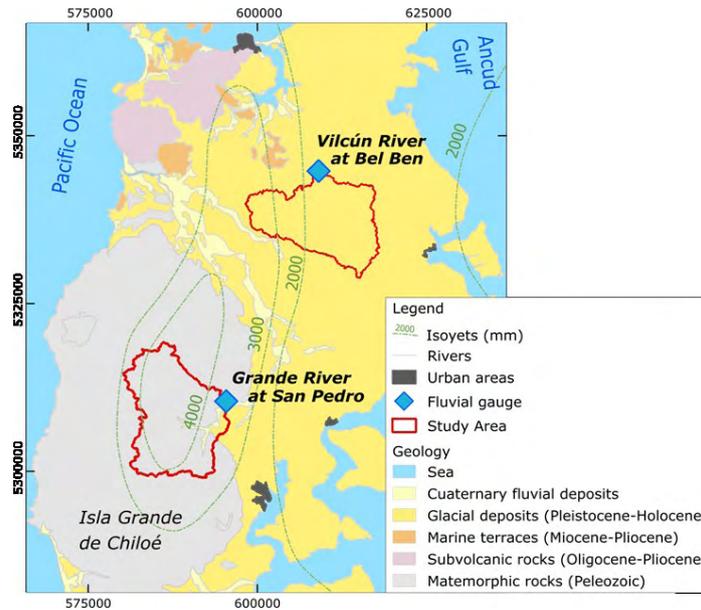


Figure 4. Geological map of the study area. Also shown are the isohyets created by the DGA (1987)

### 3. METHODS

#### 3.1 Runoff characterization

The runoff of both watersheds was characterized through the calculation of various flow indicators such as mean annual runoff (MAR), absolute minimum daily stream flow (MDS) and the flow duration curve (FDC). For all of the calculations, the precipitation and runoff series were ordered by hydrological year, from April to March, in accord with the seasonality of south-central Chile. MAR is equal to the mean value of total annual runoff, within the available data series. Along with the absolute

minimum daily stream flow records, the 95th percentile of daily runoff over the analysis period was determined as an indicator of the minimum stream flow regime of each watershed. In the case of the FDC the stream flow data were graphed on the Y axis, on a logarithmic scale, and exceedance frequency on the X axis, on a linear scale. Finally, the relationship between exceedance percentiles Q25 and Q75 defined by Watson (1965, in Singer & Cheng, 2002) was analyzed to identify the relative importance of base flow contribution for sustaining stream flows in summer. This indicator is calculated using the following expression:

$$(Q_{25}/Q_{75})^{1/2} \quad (1)$$

A lower value of this relationship indicates a greater groundwater contribution. The FDC analysis was carried out for all years less than 15 days without daily records, from December to March, for a total of 21 years.

#### 3.2 Hydrograph separation and base flow quantification

In the runoff hydrograph, base flow consists of water with a delayed release from underground storage (soil and aquifer), in contrast with the immediate runoff generated as a short-term response following a precipitation event (quick flow). In this work

hydrograph separation was used to calculate the base flow index (BFI, Institute of Hydrology, 1980; Smathkin, 2001, WMO, 2009) as a means of assessing the relative importance of underground discharge for sustaining stream flows and to estimate the total annual base flow volume, which allows an approximation of the recharge for each studied watershed to be established (Fetter, 1994; Rutledge, 1998; Brodie & Hostetler, 2005). The base flow index (BFI) is described as an indicator of the hydrogeological properties of a watershed (WMO, 2009). It is defined as the ratio of the volume consisting exclusively of base flow and total runoff

volume. In watersheds with high groundwater contribution to river runoff, the BFI nears 1.

$$BFI = V_{base} / V_{total} \quad (2)$$

The BFI is sensitive to periods without data, such that a day without records can result in the omission of various days of data for the calculation of base flow; therefore, the missing data must be reviewed and filled in before carrying out the calculation (WMO, 2009). The separation of base flow from runoff hydrographs with daily-level data was achieved through the application of three automated methods (PART, HYSep local minimum and two-parameter digital filtering) implemented in the USGS Groundwater Toolbox (Barlow et al., 2014). The

PART method (Rutledge, 1998) works by scanning the daily runoff series to identify the days that meet a requirement of ‘antecedent recession’ and designates as groundwater discharge the total runoff on those days. For the remaining days, groundwater discharge is calculated using linear interpolation between the prior days. The ‘antecedent recession’ requirement is based on the difference in daily runoff records in the interval between the examined day and N previous days, where N is given by the expression:

$$N = A^{0.2} \quad (3)$$

Where A is the watershed area in square miles. This empirical relationship was originally proposed by Linsley et al. (1982) and represents the number of days elapsed between a precipitation event and the

end of direct runoff. The HYSep local minimum method (Sloto & Crouse, 1996) verifies that the runoff record is a local minimum in an interval I defined by:

$$I = [0.5(2N * -1)] \quad (4)$$

Where N is the same value calculated by the Linsley et al. (1982) expression. Each minimum value corresponds to a base flow value for the given day, while for the intermediate days the base flow value is determined by linear interpolation. Digital filter techniques come from signal analysis and consist of the separation of hydrograph components that behave

as high-frequency signals (direct runoff or quick flow) from those that behave as low-frequency signals, where base flow is found (Sponberg, 2000; Schwartz et al., 2012). Two-parameter digital filtering (Eckhardt, 2005; 2008) calculates the base flow on a given day (bt) using the following expression:

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max}) a b_{t-1} + (1 - a) BFI_{max} y_k}{1 - a BFI_{max}} \quad (5)$$

Where  $\alpha$  is the (dimensionless) recession constant, bt and bt-1 are the base flow of time interval t and t-1, BFI<sub>max</sub> is the long-term maximum value that the relationship between base flow and total runoff can have and y<sub>k</sub> is the runoff record of the calculated day. To select a recession constant for each watershed an analysis of recession segments was carried out using the RECESS application of the same program. Recession segments over 12 days were selected by eliminating the first days that departed from

linear or quasilinear behavior. Thus, a value of 0.950 was obtained for the Vilcún River watershed and 0.977 for the Grande River watershed. According to Eckhardt (2005) the value of BFI<sub>max</sub> depends on the hydrogeological characteristics of each watershed, and can be preliminarily set at 0.8 for perennial watercourses that drain porous or detrital aquifers and at 0.25 for watercourses that flow over a fractured rock substrate. In this work this parameter was estimated using the method

proposed by Collischonn and Fan (2013), which is implemented in the GW Toolbox application and likewise uses watershed runoff data and the previously defined recession constant.

### 3.3 Record availability and analysis period

Daily records were collected from the Vilcún River at Bel Ben and Grande River at San Pedro DGA stream flow monitoring stations. The data were compiled from the DGA institutional web portal. The records of the Vilcún and Grande River stations cover the period between 1990 and 1991 to 2017, respectively. However, after 2004 there are significant interruptions in the

data, which made it necessary to select an equivalent record period to allow the results to be compared. The analysis of summer runoff indicators was carried out only in years with complete records, in the December to March period. The record period selected for the summer runoff analysis ultimately covered the period of hydrological years between 1991 and 2012, with the exclusion of 2005 and 2007, which is equivalent to 20 years of analysis. For the annual base flow analysis a similar period was chosen, but with the additional exclusion of 1996, 2004, 2008 and 2010, resulting in a total analysis period of 14 years.

Table 2. Stream flow monitoring stations of the study

Gaugin Station	Coordinates WGS-84, 18S	Watershed area	Record period
Vilcún River at Bel-Ben	N:5344739; E: 609034	176 km <sup>2</sup>	1990 to 2017
Grande River at San Pedro	N: 5310444; E: 595392	203 km <sup>2</sup>	1991 to 2017

In Figure 5 it is observed that the runoff regimes of both watersheds are in harmony with precipitation distribution, which highlights their pluvial character. The difference in absolute stream flow volume between the two watersheds (Figure 5a) also appears in the runoff hydrograph normalized by watershed area (Figure 5b), which indicates that this difference

is not a result of the watershed dimensions. According to what can be observed in Figure 5 it is estimated that the factor that most influences this behavior is the greater precipitation over the Grande River watershed due to the orographic effect on precipitation distribution caused by the Coastal Range.

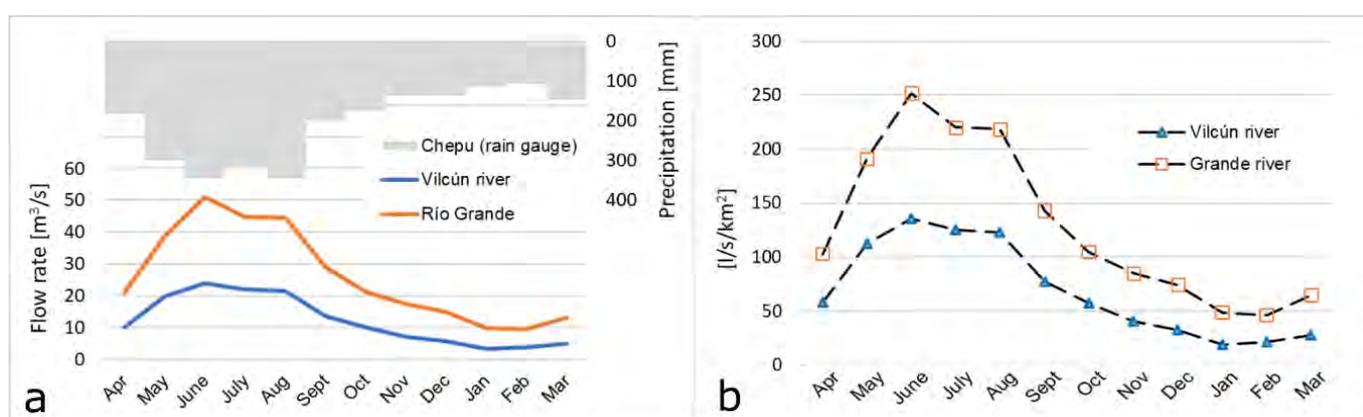


Figure 5. a) Monthly runoff hydrograph for the Grande and Vilcún River stations. Upper half of the graph shows precipitation at the Quemchi station. b) Monthly specific stream flow hydrograph for the Vilcún River at Bel Ben and Grande River at San Pedro stream flow monitoring stations.

#### 4. RESULTS

##### 4.1 Runoff indicators: MAR, 95th percentile and minimum daily stream flow.

The value of the absolute minimum stream flow for the Grande River station reached its extreme in hydrological year 2007, with 1.02 m<sup>3</sup>/s. Meanwhile, at the Vilcún River station that same year, there is a significant interval of days without records in the months of February and March, after a recording of

0.2 l/s, which could correspond to an unrecorded zero flow events. The minimum recorded value in the Vilcún River watershed was reached in hydrological year 2003, with 0.16 m<sup>3</sup>/s. The minimum stream flow distribution extends from December to April, with greater frequency during the months of February and March. In addition, the value of the 95th percentile, which corresponds approximately to the stream flow that is not exceeded during the 18 lowest-flow days in the watercourse, is shown in Table 3.

Table 3. Absolute minimum annual stream flows and 95th percentile

Station	MAR (mm)	MAR (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>95</sub>	Absolute min Q (m <sup>3</sup> /s)
Vilcún River at Bel Ben	2171	12.15	0.70	0.16
Grande River at San Pedro	4055	26.08	1.90	1.02

##### 4.2 Flow duration curves (flow duration analysis).

In Figure 6 the absolute summer flow duration curves for the entire selected period are shown. It is observed that the two curves mostly follow semi-parallel paths, with differences at the lowest-flow extreme, above 80% exceedance probability. At the

extreme right of the graph, the greater descent observed in the Vilcún River curve reflects a greater sensitivity of the watercourse to the low-flow period, exhibiting a greater streamflow decrease in months with less precipitation.

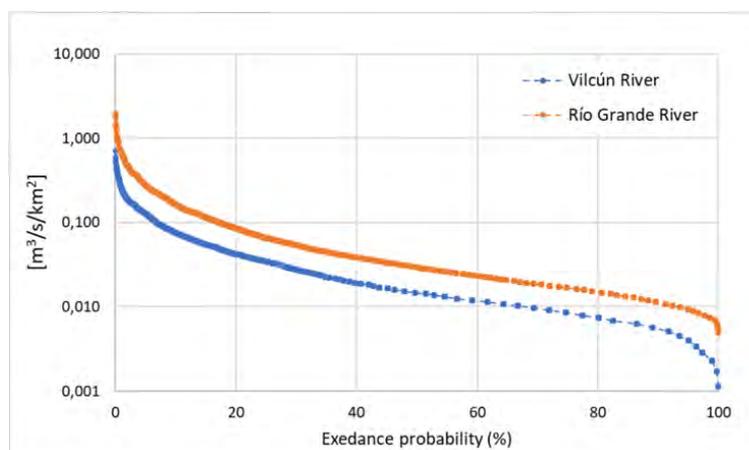


Figure 6. Flow duration curve for common periods from December to April at the two studied stream flow monitoring stations

The monthly data FDC (December to April) for an exceedance probability over 50% are shown in Figure 7. The Vilcún River watershed exhibits greater differentiation in monthly stream flow behavior than the Grande River watershed, the records of which from the summer months are more even. In both watersheds it is observed that the months with the lowest productivity are January and February; in the

following months a recovery or increase in stream flow, which is most pronounced in April, can be noted. As observed in Figure 6, the greater sensitivity of the Vilcún River watershed to the decrease in stream flows during the months of December to March compared to the Grande River watershed is evidenced.

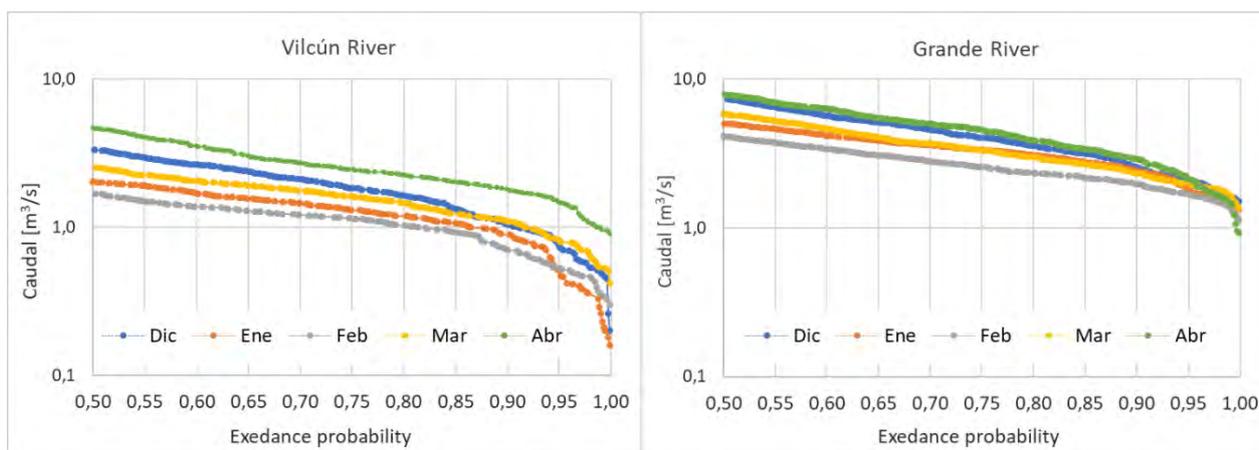


Figure 7. Monthly flow duration curves for the months of December, January, February, March and April at the Grande River and Vilcún River streamflow monitoring stations.

Table 4 and Table 5 show the results of the Walton (1965) index for the estimation of the importance of groundwater contributions to sustaining runoff. A lower value of this index represents a greater proportion of the groundwater component in the runoff of the watercourse. In Table 4 it is observed that the Walton relationship applied to both annual and summer period's exhibits similar values for both watersheds. However, at a monthly level (Table 5), it is observed that the Vilcún River watershed continually obtains lower index values in comparison to the Grande River station, indicating that, in the

former, discharge from groundwater storage is more important for sustaining surface flow in the analyzed months.

#### 4.3 Base flow index (BFI)

The BFI results obtained by the three calculation methods, using 0.629 as the BFI<sub>max</sub> value for Vilcún River watershed and 0.308 for Grande River, for the case of the Digital Filter method (DF 2), are shown Table 6. The results are presented for the December-March period and for the entire hydrological year.

Table 4. Walton (1965) indicator based on exceedance relationships for the annual and summer (December to March) periods

Watershed	Unit	Annual	Summer
		$(Q_{25}/Q_{75})^{0.5}$	$(Q_{25}/Q_{75})^{0.5}$
Vilcún River at Bel Ben	$\text{m}^3/\text{s}$ $\text{l}/\text{s}/\text{km}^2$	2.29	1.89
Grande River at San Pedro	$\text{m}^3/\text{s}$ $\text{l}/\text{s}/\text{km}^2$	2.28	1.90

Table 5. Walton (1965) indicator for exceedance probability in the months of December to April

	$(Q_{25}/Q_{75})^{0.5}$				
	December	January	February	March	April
Vilcún River	1.91	1.65	1.76	1.90	2.15
Grande River	1.99	1.71	1.81	1.99	2.22

Table 6. Base flow index for the Vilcún River and Grande River watersheds, for the summer and year

Year	Vilcún River						Grande River					
	BFI aestival			BFI Annual			BFI aestival			BFI Annual		
	PART	HYSep	DF 2	PART	HYSep	DF 2	PART	HYSep	DF 2	PART	HYSep	DF 2
1991	0.59	0.53	0.58	0.47	0.42	0.47	0.50	0.46	0.40	0.33	0.32	0.24
1992	0.70	0.69	0.61	0.54	0.50	0.50	0.50	0.49	0.36	0.33	0.34	0.23
1993	0.73	0.65	0.57	0.55	0.50	0.52	0.55	0.47	0.38	0.33	0.29	0.22
1994	0.69	0.69	0.57	0.45	0.46	0.47	0.46	0.42	0.33	0.44	0.49	0.29
1995	0.64	0.57	0.50	0.43	0.42	0.46	0.58	0.49	0.43	0.33	0.33	0.24
1996	0.66	0.61	0.60	0.35	0.37	0.45	0.38	0.44	0.31	-	-	-
1997	0.75	0.67	0.64	0.47	0.42	0.48	0.50	0.47	0.42	0.48	0.46	0.28
1998	0.68	0.59	0.57	0.55	0.48	0.51	0.43	0.39	0.32	0.25	0.25	0.19
1999	0.56	0.49	0.50	0.51	0.48	0.51	0.38	0.35	0.30	0.28	0.26	0.21
2000	0.60	0.54	0.55	0.54	0.54	0.52	0.34	0.39	0.25	0.37	0.38	0.24
2001	0.67	0.59	0.55	0.57	0.54	0.51	0.45	0.41	0.32	0.31	0.39	0.23
2002	0.79	0.44	0.58	0.51	0.47	0.50	0.40	0.36	0.32	0.41	0.43	0.29
2003	0.79	0.40	0.59	0.63	0.54	0.56	0.56	0.54	0.45	0.34	0.32	0.23
2004	0.76	0.65	0.63	-	-	-	0.56	0.55	0.42	0.34	0.35	0.23
2006	0.60	0.50	0.58	0.52	0.44	0.49	0.45	0.45	0.34	0.36	0.37	0.23
2008	0.49	0.47	0.53	-	-	-	0.39	0.33	0.32	0.30	0.30	0.20
2009	0.59	0.53	0.58	0.47	0.46	0.47	0.44	0.42	0.30	0.34	0.34	0.23
2010	0.56	0.54	0.54	-	-	-	0.41	0.40	0.29	0.31	0.33	0.21
2011	0.60	0.58	0.58	0.45	0.48	0.50	0.52	0.48	0.35	0.32	0.33	0.22
2012	0.59	0.54	0.54	0.51	0.45	0.48	0.43	0.41	0.33	0.32	0.31	0.22
2016	0.54	0.49	0.00	0.51	0.44	0.65	0.39	0.41	0.12	-	-	-
<b>Mean</b>	<b>0.65</b>	<b>0.56</b>	<b>0.54</b>	<b>0.50</b>	<b>0.47</b>	<b>0.50</b>	<b>0.46</b>	<b>0.44</b>	<b>0.34</b>	<b>0.34</b>	<b>0.35</b>	<b>0.23</b>

The average summer and annual BFI values are shown graphically in Figure 8, in which it is observed that in the summer, annual and monthly maximum BFI analysis periods, the values obtained for the Vilcún River are always higher than those obtained

for the Grande River watershed. In addition, in each watershed, a clear shift toward greater BFI values in the summer season is observed in comparison to the values obtained for the annual period.

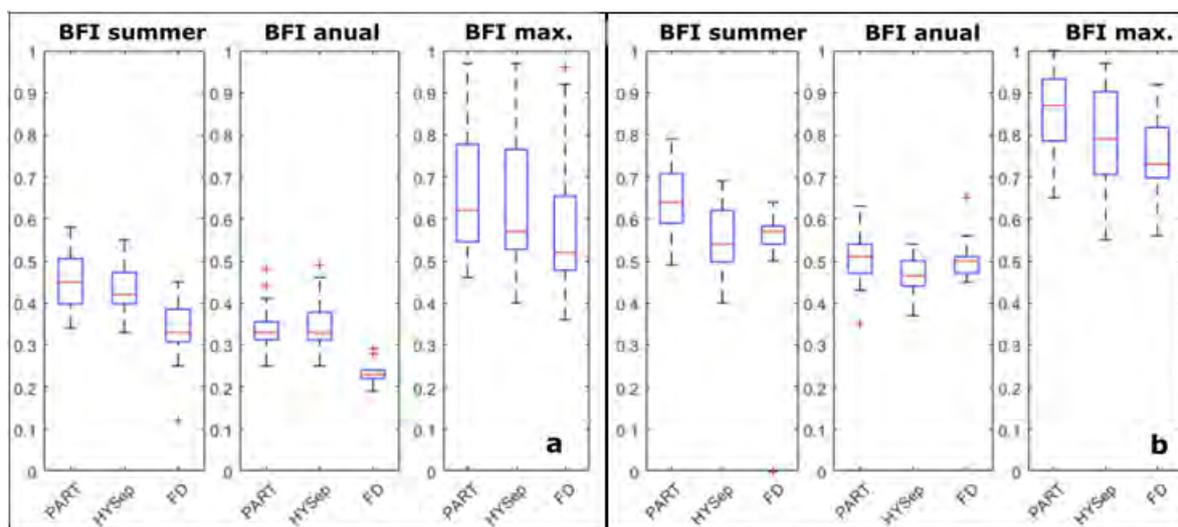


Figure 8. Comparison of obtained BFI results for the three methods used, for both watersheds (a) Grande River; (b) Vilcún River

The BFI comparison between the studied watersheds (Table 6; Figure 8) shows that in the Vilcún River watershed groundwater discharge plays a greater role in sustaining total stream flow in both the summer and annual periods. According to the results obtained with the three calculation methods, base flow participation in the December-March season accounts for between 54% and 65% of runoff in the Vilcún River watershed, while in the Grande River watershed, this component accounts for between 34% and 46%.

#### 4.4 Annual groundwater discharge

Table 7 shows the annual base flow (BF) calculation in m<sup>3</sup>/s. Annual base flow values between 5.9 and 6.4 m<sup>3</sup>/s were obtained for the Vilcún River watershed, which represent a range of 47 to 51% of the total runoff recorded at the gauging station, and between 6.6 and 9.8 m<sup>3</sup>/s for the Grande River watershed, which represent a range of 25 to 37 %, using the three selected methods.

Table 7. Average annual runoff and base flow values calculated for the years with complete data in both watersheds

Año	Vilcún River [m <sup>3</sup> /s]				Grande River [m <sup>3</sup> /s]			
	Q Anual	PART	HYSep	DF 2	Q Anual	PART	HYSep	DF 2
1991	12.9	6.0	5.4	6.1	27.9	9.1	8.9	6.6
1992	12.0	6.5	5.9	6.0	25.4	9.3	9.5	6.4
1993	11.1	6.0	5.5	5.7	23.6	9.2	8.2	6.2
1994	16.0	7.2	7.3	7.5	36.0	12.3	13.6	8.1
1995	12.9	5.5	5.3	5.9	25.5	9.2	9.1	6.7
1997	13.3	6.3	5.6	6.4	29.5	13.4	13.0	7.8
1998	9.4	5.1	4.5	4.8	20.8	7.0	7.0	5.2
1999	10.9	5.6	5.3	5.6	24.2	7.8	7.3	5.7
2000	15.4	8.2	8.1	7.8	26.9	10.3	10.7	6.8
2001	12.5	7.1	6.7	6.3	24.4	8.8	10.9	6.3
2002	16.8	8.6	7.9	8.4	31.3	11.4	12.1	8.1
2003	12.3	7.7	6.7	6.9	25.1	9.5	9.0	6.5
2006	12.3	6.3	5.4	6.1	25.8	10.1	10.2	6.4
2009	11.3	5.3	5.1	5.3	26.4	9.6	9.7	6.3
2011	11.5	5.2	5.5	5.7	23.7	8.9	9.1	6.3
2012	9.8	5.0	4.4	4.7	25.6	9.0	8.5	6.1
□	<b>12.5</b>	<b>6.4</b>	<b>5.9</b>	<b>6.2</b>	<b>26.4</b>	<b>9.7</b>	<b>9.8</b>	<b>6.6</b>
%	<b>100%</b>	<b>51%</b>	<b>47%</b>	<b>50%</b>	<b>100%</b>	<b>37%</b>	<b>37%</b>	<b>25%</b>

## 5. COMMENTS AND CONCLUSIONS

The studied watersheds have significant topographic and geologic differences that to a large extent determine runoff behavior. The orographic effect strongly impacts the precipitation distribution, resulting in the Grande River watershed receiving more than twice the water that the Vilcún River watershed receives (4131 vs. 2294 mm/year, respectively). The mean runoff (MAR) and minimum

stream flow (Q95 and absolute minimum) indicators reflect their differences in stream flow productivity well. Both rivers are perennial, although they exhibit a significant difference in minimum annual stream flow values, which present a range of 0.16-1.58 m<sup>3</sup>/s for the Vilcún River and 1.02-2.11 m<sup>3</sup>/s for the Grande River.

The results obtained from both FDC analysis and BFI determination are consistent in indicating that the

Vilcún River watershed exhibits greater dependence on groundwater storage contributions to sustain annual and summer runoff compared to Grande River watershed.

The monthly flow duration curve (FDC) analysis showed that both watersheds exhibit their lowest stream flows during the month of February, following the precipitation regime, although the Vilcún River watershed exhibits a greater decrease in stream flows during the summer months, which is interpreted as greater sensitivity to the summer effect. Thus, it bears asking why the watershed with a permeable geological substrate and recognized groundwater storage potential generates this effect on the watercourse of the Vilcún River. It is suggested that the pronounced effect of the decreased stream flow of the watercourse is due to a decrease in the phreatic aquifer level, which could be near the level of the riverbed, decreasing its flows.

The Walton index showed sustained differences between watersheds only in the values calculated at a monthly level for the summer period, indicating that the groundwater component is more important in the Vilcún River watershed in all of the months in the sample. The same indicator applied to the FDC of the entire record period gave very similar values for the two watersheds, which may mean that it is unsuitable for annual records from wet watersheds such as those analyzed in this study.

The base flow separation method using the PART, HYSEP and digital filter (DF) techniques reached values that were consistent with each other. The greatest difference among the selected techniques was obtained with the DF method in the Grande River watershed, which resulted in a BF value around 12% less than that obtained using the PART and HYSEP methods. The observed differences are a result of the sensitivity of this method to the  $B_{max}$  parameters, which retrieve information from recession behavior during the longest periods after the end of rainfall. The PART and HYSEP methods depend only on the empirical parameter  $N$  of Linsley et al. (1982), making their results insensitive to information provided by recession.

The  $BFI_{max}$  parameter determined by applying the GW Toolbox, according to the recession behavior of each watercourse, resulted in values of 0.629 for the Vilcún River and 0.308 for the Grande River, which are consistent with the contrasting lithology on which each watershed lies. In previous works that have used

the digital filter method, such as those of Collinshonn and Fan (2013) and Eckhardt (2005), values between 0.25 and 0.51 have been described for watersheds with hydrogeological substrates composed of fractured rocks and between 0.52 and 0.95 for watersheds on detrital aquifers.

Various authors mention that the quantification of base flow allows a first approximation of annual recharge of the groundwater environment of the watershed. In this study recharge ranges of around 50% of precipitation for the Vilcún River watershed, which are equivalent to 6.2 m<sup>3</sup>/s, and between 25 and 30% of precipitation for the Grande River watershed, equivalent to a range between 6.6 and 9.7 m<sup>3</sup>/s, were obtained.

The quantification of base flow in the Vilcún and Grande River allowed it to be recognized that the runoff in both watersheds is strongly influenced by discharge from the groundwater environment even though each has a very different geological composition. In the case of the Grande River watershed, it is probable that groundwater storage is shaped by the powerful thickness of the organic soils that sustain rainforest formations. Other natural formations such as the peat bogs that exist in the upper part of the watershed also contribute to maintaining significant water storage, which is subsequently released by gravity with a lag after precipitation peaks.

One of the implications of this assessment is that the exploitation of water from the groundwater environment or significant alteration of land use can result in major changes in summer runoff. In addition, the estimated recharge values must be subject to valuation in conjunction with other variables that depend on water resources in order to define a sustainable use rate to avoid altering river, wetland and forest environments, which make up part of the hydrological equilibrium of Chiloé Island.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors wish to express our thanks for the support given by the Chilean Scientific Council (Conicyt) through the project ANID/FONDAP/15130015. Also, it is important to express our gratitude to the Chilean Dirección General de Aguas and SERNAGEOMIN for the support given to some of the works here described.

## REFERENCIAS

- Balek, J. 1989. *Groundwater Resources Assessment*. Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York – Tokyo.
- Barlow, P.; Cunningham, W.; Zhai, T.; Gray, M. 2014. *Geological Survey Groundwater Toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0)—User guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. B10, 27 p.*, <http://dx.doi.org/10.3133/tm3B10>.
- Borgel, R. 1983. *Geografía de Chile: Geomorfología, Vol. 2*. Instituto Geográfico Militar, 182 p.
- Brodie R.S. and Hostetler S., 2005. A review of techniques for analysing base-flow from stream hydrographs. In: *Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference, 28 Nov-2 Dec, 2005, Auckland, New Zealand*.
- Collischonn, W; Fan, F. M. 2013. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter: *Hydrological Processes*, 27: 9 p.
- FCFM, U. Chile - CONAMA, 2006. *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, Informe Final*. Realizado por el departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Publicado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Gobierno de Chile.
- Fetter, C. 1994. *Applied Hydrogeology*. 3rd Edition, Macmillan College Publishing Company, New York.
- Figueroa, P. 2014. *Variabilidad de las precipitaciones (1965-2012) en Chile centro-sur (33,9°S – 41,6°S) mediante índices estadísticos y temporales de la irregularidad*. Memoria de Título de la carrera de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.
- DGA-Ayala, Cabrera y Asociados Ltda, 2007. *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras, Zona II. Regiones V a XII y Región Metropolitana*. S.I.T. 123. 986 p.
- DGA, 1988. *Balance Hídrico de Chile - 1987*. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
- DGA, 2014. *Análisis crítico de las redes hidrométricas. Zona Sur. Informe Final*. S.I.T. N° 344. Elaborado por la empresa Sociedad de Servicios Profesionales en Recursos Hídricos y Medio Ambiente Limitada para la Dirección General de Aguas.
- DGA, 2016. *Situación de sequía y escasez hídrica en zonas extremas*. Presentación ante la Comisión de Zonas Extremas y Antártica Chilena de la Cámara de Diputados de Chile. Documento en línea: [https://www.camara.cl/trabajamos/comision\\_listadodocumento.aspx?prmID=494](https://www.camara.cl/trabajamos/comision_listadodocumento.aspx?prmID=494)
- Duhart, P., Muñoz, J. y Stern, C. 2000. *Geología de la Isla Grande de Chiloé, X. Región de los Lagos, Chile*. In IX Congreso Geológico Chileno, Actas 1, Sesión Temática N° 3: 5 p. Puerto Varas, Chile.
- Errazuriz, A. M.; Cereceda, P.; Gonzalez, J. I.; González, M.; Henríquez, M.; Rioseco, R. 1998. *Manual de geografía de Chile*. Editorial Andrés Bello, Tercera Edición.
- Juliá, C.; Carmona, M. 2011. *Estimación de Precipitaciones en un año normal en la localidad del proyecto eólico Transantartic Energía S.A ubicado en la comuna de Dalcahue, región de Los Lagos, Isla de Chiloé*. Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto Parque Eólico San Pedro, Adenda 1, Anexo B. Gobernación Provincial de Chiloé, 2015. *Estrategia de recursos hídricos de la Provincia de Chiloé*
- Garreaud, R. 2011. *Cambio Climático: Bases Físicas e impactos en Chile*. *Revista Tierra Adentro – INIA*, 93: 14 p.
- Horton, R. 1933. *The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle*. *Transactions of the American Geophysical Union*, 14: 15 p.
- Kirchner, J. 2009. *Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward*. *Water Resources. Research.*, 45: 34 p.

- Lastoria, B. 2008. Hydrological processes on the land surface: a survey of modelling approaches. FORALPS Technical Report, 9. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy, 56 p.
- Lee, Ch-H; Chen, W-P; Lee, R-H. 2006. Estimation of groundwater recharge using water balance coupled with base-flow-record estimation and stable-base-flow analysis
- Linsley, R.; Kohler, M. Paulhus, J. 1958. Hydrology for engineers, McGraw-Hill. Edición Española: Hidrología para ingenieros, Ediciones Castilla.
- Linsley, R.; Kohler, M. Paulhus, J. 1982. Hydrology for engineers (3rd ed.): Ney York, McGraw, 508 p.
- Mallén, L. 2015. Enfrentando la crisis desde las comunidades, 2014-2015: Evaluación y avances de la gestión de hídrica en Chiloé. Presentación en: 2° Cabildo del agua en Chiloé, Dalcahue. Inédito.
- Ministry of Natural Resources and Forestry (MNRF)-Ontario CA. 2014. Baseline Hydrology: For the Southwestern Hudson Bay and Nelson River Watershed Systems. Technical Release. Disponible en Internet en: [www.sse.gov.on.ca/sites/MNR-PublicDocs/EN/CMID/Baseline Hydrology Statistics - Data Analysis.pdf]
- MOP, 2017. Declara zona de escasez hídrica a las comunas de Quemchi y Quellón, provincia de Chiloé, Región de Los Lagos. Decreto M.O.P. N°84/2017. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile.
- Páez, D.; Quiroz, D.; Feuker, P.; Derch, P.; Duhart, P. 2015. Geología para el ordenamiento territorial: área de Castro, región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. 21: 91 p. 6 mapas [escala 1:100.000].
- Rutledge, A. 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records—update. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations Report 98-4148.
- Singer, S.; Cheng, C. 2002. An assessment of the groundwater resources of northern Ontario. Hydrogeology of Ontario Series (Report 2). Ministry of the Environment of the Ontario Government. 119 p.
- Sloto, R.; Crouse, M. 1996. HYSEP: A Computer program for streamflow hydrograph separation an analysis. U. S. Geological Survey, Water -Resources Investigation Report 96-4040, 46 p.
- Toebes, C.; Ouryvaev (Ed.). 1970. Representative and experimental basins. In International guide for research and practice. Studies and reports in hidrology, No. 4. Unesco, 348 p.
- Troncoso, R.; Pérez, Y.; Feuker, P.; Páez, D.; Muñoz, J., 2008. Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea de la Depresión Central de las regiones de Los Ríos y Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-08-34, 175 p., 8 mapas [escala 1:250.000].
- Smakhtin, V. 2001. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240: 40 p.
- Valdez, R. 2009. Análisis del comportamiento espacial y temporal de las precipitaciones en la región de Los Ríos, la región de Los Lagos y la región de Aysen. Memoria de Título, Ing. Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca.
- World Meteorological Organization (WMO), 2008. Manual on low-flow: Estimation and prediction. Operational hidrology report No. 50. WMO-No. 1029.
- Arenas, M.; Duhart, P. 2003. Geología del área Castro-Dalcahue, Región de los lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N°79: 29 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Welderufael, W.; Woyessa, Y. 2010. Stream flow analysis and comparison of flow separation methods, Case study of the Modder River Basin in Central South Africa. European Water 31: 3-12.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

## Evaluación de humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de aguas residuales rurales en la Región del Maule: análisis del potencial de reutilización de sus efluentes en riego

*Evaluation of constructed wetlands planted with ornamental plants for rural wastewater treatment in Maule Region: analysis of potential effluent reuse in irrigation*

Ismael L. Vera-Puerto<sup>1\*</sup>, Luis Rojas<sup>1</sup>, Claudio Contreras<sup>1</sup>, Franklin Zuñiga<sup>1</sup>, José López<sup>1</sup>, Claudia Sangüesa<sup>2</sup>, Christian Correa<sup>1</sup>, Carlos A. Arias<sup>3,4</sup>, Mariela Valenzuela<sup>5</sup>

Recibido: 19/09/2021

Aceptado: 01/11/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El concepto de economía circular implica que las zonas rurales de Chile incrementen el tratamiento de sus aguas servidas con tecnologías sostenibles y reutilicen sus efluentes para tener una fuente de agua alternativa para riego. Así, este trabajo evaluó el potencial de reutilización en riego, de los efluentes a dos humedales construidos (HC) aplicados al tratamiento de aguas servidas de una zona rural en la Región del Maule. Para esto, por 10 meses, se operó a escala piloto dos HC de flujo subsuperficial: horizontal y vertical. Los HC se plantaron con la especie ornamental *Zantedeschia aethiopica*. Se evaluó la calidad del agua en el afluente y efluentes, y se comparó con normativas de reutilización. Los resultados mostraron similitud en el comportamiento de los efluentes a los HC, con diferencias sólo para DQO y NT. Además, para que los efluentes a los HC se clasifiquen en una categoría de reutilización, es necesario adicionar un sistema de desinfección. Los efluentes al HC horizontal presentaron mayor grado de cumplimiento para categorías de reutilización en riego. Para la normativa chilena, los efluentes a los dos HC presentaron un grado de clasificación similar, pero por la falta de experiencia en Chile reutilizando efluentes, se recomienda una primera etapa, enmarcarlos en categorías que no consideren riego de alimentos. Finalmente, este trabajo logró demostrar el potencial de los HC para el tratamiento de aguas servidas en zonas rurales y la reutilización de sus efluentes como agua de riego, contribuyendo a reducir la presión sobre los recursos hídricos.

**Palabras clave:** aguas servidas, humedal construido, reutilización, Región del Maule, *Zantedeschia aethiopica*

### Abstract

The circular economy concept requires in rural areas of Chile to increase the treated wastewater with sustainable technologies and reuse its effluents to ensure a new water source for irrigation. Therefore, this work evaluated the potential for effluents reuse from two constructed wetlands (CWs) applied to the treatment of wastewater in a rural area in the Maule Region. For this, two subsurface flow CWs were operated for 10 months on a pilot scale: horizontal and vertical. The CWs were planted with *Zantedeschia aethiopica*. The water quality was measured in influent and effluents, and compared with reuse regulations. The results showed similarity in the behavior of the effluents from the two CWs, presenting only differences in COD and TN. In addition, for the effluents from the two CWs can be classified in a reuse category, a complementary disinfection system is necessary. The effluents from the horizontal CW showed a higher degree of compliance for various categories of reuse for irrigation. For Chilean regulations, the effluents from the two CWs presented a similar degree of classification, but due to the lack of greater experience in Chile with the reuse of treated wastewater, it is recommended in a first stage, to frame them in categories that do not consider food production. Finally, this work demonstrates the potential of applying CWs in the treatment of wastewater from rural areas and reuse its effluents as irrigation water, contributing to reduce the pressure over water resources.

**Keywords:** wastewater; constructed wetland; reuse; Maule Region, *Zantedeschia aethiopica*

- 1 Centro de Innovación en Ingeniería Aplicada (CIIA), Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica del Maule, Av. San Miguel 3605, Talca, Chile. ivera@ucm.cl - leovera82@gmail.com
- 2 Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA), Universidad de Talca, Casilla 747, Avenida Lircay s/n, Talca, Chile
- 3 Department of Biology-Aquatic Biology, Aarhus University, Ole Worms Allé 1, 8000 Aarhus C, Denmark
- 4 WATEC Aarhus University Centre for Water Technology, NyMunkegade, Bldg. 1521, 8000 Aarhus C, Denmark
- 5 Superintendencia del Medio Ambiente, Oficina Regional del Maule, Calle Uno Norte 801, piso 11, Edificio Plaza Centro, Talca, Chile.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Chile se han documentado poco más de 550 plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) instaladas en zonas descentralizadas, que incluyen a las zonas rurales (Subdere, 2015). Estas PTAS en más del 70% están basadas en tratamiento secundario mediante la tecnología de lodos activados, tendencia similar a las de las zonas urbanas del país (Vera et al., 2016). Además, existe un 9% que únicamente emplea tecnología de sedimentación como son las fosas sépticas, con la necesidad de incorporar más etapas para completar su proceso de tratamiento (Vera et al., 2016). Pese a la gran cantidad de PTAS, en las zonas rurales se ha documentado una cobertura máxima de alcantarillado de sólo 25%, por lo que la cobertura de tratamiento, no definida con claridad, sería aún menor y estimada en alrededor del 10% (MOP, 2021; Mena et al., 2020). Además, no existe información oficial de su funcionamiento. Rodríguez (2012), evaluando PTAS de las zonas rurales de la Región de Coquimbo, Valparaíso, Maule y Metropolitana, concluyó que la mayoría funciona de manera inadecuada desde el punto de vista de la sostenibilidad económica y del cumplimiento de la normativa vigente, y plantea la necesidad de explorar tecnologías más sostenibles. De este modo, las zonas rurales de Chile deben integrar el concepto de economía circular para aumentar cobertura y garantizar la sostenibilidad de sus PTAS en el largo plazo.

Por otro lado, el país atraviesa una prolongada sequía que se ha extendido por más de 10 años (Garreud et al., 2019), lo que ha motivado la discusión nacional a encontrar nuevas fuentes hídricas, especialmente para riego en la agricultura (Vera-Puerto et al., 2021a; Donoso y Rivera, 2020). En esta discusión, la reutilización de los efluentes a PTAS, sería una alternativa aún en evaluación en Chile. A nivel mundial, la preocupación por una reutilización segura de efluentes ha llevado a la promulgación de diversas guías y normativas, que definen estándares de calidad del agua enfocados a preservar la salud de las personas, los cultivos y el medio ambiente (Vera et al., 2016; Vera-Puerto et al., 2021a). Así, esta alternativa hídrica presenta un gran potencial para las zonas rurales, dado que estaría en línea con la visión de economía circular necesaria para incrementar la cobertura a este sector de la población (Villamar et al., 2018; Vera-Puerto et al., 2019; Vera-Puerto et al., 2020). En este sentido, para la Región del Maule, que presenta un 27% de población viviendo en la

ruralidad (INE, 2021), y donde la agricultura, juega un papel importante en su economía (ODEPA, 2021), se hace necesario estudiar alternativas tecnológicas para mejorar la cobertura de tratamiento de aguas servidas en las zonas rurales, con tecnologías más sostenibles, y tener una nueva fuente de agua para riego. Tomando en cuenta lo anterior, las soluciones basadas en la naturaleza, y en particular, la tecnología de humedales construidos ha demostrado internacionalmente que presenta el potencial de integrar estos dos tópicos (Vera et al., 2011; Avellán et al., 2019; Nan et al., 2020).

Los humedales construidos (HC) se definen como un sistema de ingeniería diseñado y construido para embalsar el agua bajo diferentes condiciones operativas, aprovechando así los procesos naturales que involucran vegetación, suelos, bacterias y energía solar, para mejorar su calidad (Vera et al., 2016). De acuerdo a la dirección de flujo y a la posición del nivel de agua, los humedales construidos se clasifican en los tres tipos que se conocen principalmente: a) flujo superficial horizontal, b) flujo subsuperficial horizontal (HC-FH), y c) flujo subsuperficial vertical (HC-FV) (Fonder & Headly, 2013). De estos tres tipos de HC, los de flujo subsuperficial han sido más aplicados al tratamiento de aguas servidas (Zhang et al., 2014; Rodríguez-Domínguez et al., 2020). Comparativamente, en Latinoamérica se ha utilizado más el HC-FH (Rodríguez-Domínguez et al., 2020). Sin embargo, se requiere avanzar en el estudio de HC-FV en la realidad Latinoamericana y chilena, ya que presentan ventajas como su capacidad para tratar mayores cargas orgánicas ( $>6 \text{ gDBO}_5/(\text{m}^2\text{-d})$ ), lo que trae consigo una reducción de la necesidad de área (HC-FV, 2–4  $\text{m}^2/\text{hab.}$ ; HC-FH, 5  $\text{m}^2/\text{hab.}$ ) y una mayor capacidad de nitrificación (reducción del amonio en más del 80%) (Vera-Puerto et al., 2021b). En este sentido, recientemente se ha documentado la aplicación de HC-FV a escala laboratorio en la Región del Maule (Vera-Puerto et al., 2021b; Vera-Puerto et al., 2021c), pero sin un enfoque específico en la reutilización de sus efluentes, faltando también, una comparación respecto a su comportamiento con un HC-FH, que como se comentó, es el tipo de HC más utilizado en Latinoamérica.

Tomando en cuenta lo anterior, este trabajo evalúa el potencial de reutilización de los efluentes a dos tipos de humedales construidos de flujo subsuperficial aplicados al tratamiento de aguas servidas de una zona rural, bajo las condiciones climáticas de la Región del Maule.

## 2. METODOLOGÍA

A continuación, en esta sección, se presentan los diferentes elementos considerados en los 10 meses de operación de este trabajo, que incluye las estaciones de invierno y primavera. Los elementos que se describen son las características del afluente con que se alimentó el sistema experimental, las características técnicas y la configuración de los dos tipos de HC evaluados, la estrategia de operación y monitoreo, junto con los métodos analíticos que se siguieron, y finalmente, los métodos estadísticos utilizados para comparación.

### 2.1 Afluente

Para alimentar el sistema experimental se trabajó con agua residual (aguas servidas) originadas por una comunidad rural. Para esto fue necesario construir el sistema experimental dentro de la PTAS que da cobertura a esta comunidad. Además, se hizo un pre-tratamiento para la reducción de los sólidos del afluente que finalmente fue aplicado a los HC. El pre-tratamiento del afluente incluyó un pre-tratamiento por tamizado a través de una cámara de rejillas que se localiza en la estación de bombeo que alimenta a la PTAS. En el tubo de ingreso a la PTAS, se tomó parte del afluente, y a esta porción, se le sometió a un proceso de decantación de sólidos. La Tabla 1 resume las características físicas y químicas del afluente general, agua cruda, y del agua decantada, siendo esta última, la aplicada a los HC experimentales, y cuyas características fueron divididas por las estaciones de invierno y primavera, que fueron las estaciones principales de monitoreo.

La Tabla 1 presenta los valores de concentración para los parámetros de calidad del agua monitoreados, que pueden ser categorizados como típicos para aguas servidas en Chile (Vera et al., 2016; Villamar et al., 2018). En cuanto al efecto del uso del sistema de decantación, se observa un incremento de la DQO para la época de invierno, que se explica por un par de valores elevados al inicio (por sobre 1000 mg/l), relacionados con la presencia de material orgánico efluente por accidente del sistema de decantación, dado que aún se encontraba en período de aclimatación. Por su parte, en el caso de los SST, se observa un efecto positivo del sistema de decantación: reduce en más de un 50% la concentración del agua cruda. El resto de parámetros, en general, no sufre modificación por la implementación del sistema de decantación.

### 2.2 Configuración del sistema

Se construyó un sistema de tratamiento de aguas residuales para la evaluación comparativa de dos tipos de HC de flujo subsuperficial: a) horizontal (HC-FH) y b) vertical (HC-FV). La Figura 1 presenta el sistema de tratamiento propuesto. El sistema fue implementado a un costado de la PTAS que da cobertura a la localidad rural de La Obra (aprox. 2100 habitantes), cercana a la ciudad de Curicó (Región del Maule, Valle central, Chile, 35°01'29'' S, 71°13'09'' E). El clima de la zona es templado de tipo Mediterráneo, con precipitaciones medias anuales de 658 mm, concentradas en el invierno, y temperaturas medias de alrededor de los 8°C en esta estación, con veranos calurosos, de temperaturas máximas por sobre los 30°C y ausencia de precipitaciones (Sarricolea et al., 2017; MeteoChile, 2021).

El HC-FH fue construido con un área superficial experimental de 3.51 m<sup>2</sup> (Ancho: 1.3 m; Largo: 2.7 m), siguiendo valores similares reportados por Vera et al. (2011) para un habitante equivalente en clima mediterráneo. La profundidad total fue de 0.62 m, compuesta por 0.1 m de borde libre y 0.52 m por el medio de soporte. La altura de lámina de agua fue mantenida alrededor de 0.4 m, siguiendo las recomendaciones de reducción de altura de García et al. (2005). El HC-FH fue construido en base a hormigón armado. El medio de soporte utilizado fue grava de dos tamaños: a) 40 a 60 mm, aplicada en la zona de entrada y salida (0.5 m en longitud desde los extremos del HC), y b) 10 a 20 mm para el resto del lecho de humedal. Estas características de tamaño del medio de soporte son las comúnmente utilizadas en sistemas de HC-FH (Dotro et al., 2017). La alimentación fue realizada con tubería de PVC de 32 mm instalada de forma superficial en uno de los extremos del HC. La impermeabilización fue realizada con pintura asfáltica altamente impermeabilizante y anticorrosiva.

Por su parte, para el HC-FV se definió un área superficial experimental de 1.06 m<sup>2</sup> por habitante equivalente siguiendo valores similares previos reportados en clima Mediterráneo por Vera et al. (2013). La estructura del HC-FV fue constituida con un tanque plástico prefabricado que proporciona el área superficial experimental. La profundidad total del tanque fue de 1.0 m, con una profundidad del lecho de 0.9 m y con un borde libre de 0.1 m. Como material granular se utilizó grava de 10 a 20 mm instalada a una altura 0.15 m en la parte superior e

inferior, y arena clasificada como gruesa para el resto del lecho. Los materiales de relleno siguieron la recomendación de diseño usada en Dinamarca (Brix & Arias, 2005). La alimentación se realizó enterrada

en la capa superficial de grava, a través de un sistema de distribución en tuberías de PVC de 32 mm perforadas cada 0.1 m.

Tabla 1. Características del agua servida afluente (n=5 por cada estación)

Parámetro	Unidad	Estación	Agua Cruda		Agua Decantada	
			Media $\pm$ desviación estándar	Rango (Min-Max)	Media $\pm$ desviación estándar	Rango (Min-Max)
pH	Unidad	Invierno	7.6 $\pm$ 0.5	7.1 - 8.3	7.5 $\pm$ 0.2	7.3 - 7.8
		Primavera	7.5 $\pm$ 0.3	7.2 - 7.9	7.3 $\pm$ 0.2	7.13 - 7.47
T	°C	Invierno	14.7 $\pm$ 2.7	10.5 - 17.5	14.3 $\pm$ 2.8	10.2 - 17.5
		Primavera	20.4 $\pm$ 1.4	18.8 - 22.0	19.4 $\pm$ 2.1	17.0 - 22.0
CE	$\mu$ s/cm	Invierno	793 $\pm$ 147	559 - 928	785 $\pm$ 25	773 - 825
		Primavera	830 $\pm$ 146	733 - 1002	840 $\pm$ 135	738 - 1039
ORP	mV	Invierno	-44.5 $\pm$ 76.4	-152.4 - -46.1	-106.2 $\pm$ 116.3	-212.17 - +77.7
		Primavera	-78.7 $\pm$ 49.9	-120.4 - +79.9	-202.3 $\pm$ 42.6	-240.5 -143.3
DQO	mg/l	Invierno	226.0 $\pm$ 65.5	130.0 - 304.0	665.0 $\pm$ 432.5	142.0 - 1001.0
		Primavera	159.3 $\pm$ 44.5	101.0 - 209.0	150.3 $\pm$ 23.2	121.0 - 177.0
SST	mg/l	Invierno	166.5 $\pm$ 75.0	41.4 - 239.2	88.9 $\pm$ 57.3	30.7 - 194.1
		Primavera	117.5 $\pm$ 13.2	101.4 - 137.8	41.7 $\pm$ 11.9	34.0 - 70.0
PT	mg/l	Invierno	4.1 $\pm$ 1.2	2.4 - 5.2	3.5 $\pm$ 1.0	2.0 - 4.1
		Primavera	3.6 $\pm$ 0.9	3.4 - 4.5	4.1 $\pm$ 0.4	3.8 - 4.6
NT	mg/l	Invierno	45.6 $\pm$ 17.0	24 - 68	41.0 $\pm$ 4.9	34.0 - 48.0
		Primavera	28.5 $\pm$ 17.8	4.7 - 47.2	36.5 $\pm$ 6.6	29.0 - 45.0
Coliformes totales	Log <sub>10</sub> (NMP/100 ml)	Invierno	7.6 $\pm$ 0.1	7.44 - 7.74	7.1 $\pm$ 0.4	6.7 - 7.5
		Primavera	7.5 $\pm$ 0.2	7.32 - 7.81	6.8 $\pm$ 0.4	6.5 - 7.4
<i>E. Coli</i>	Log <sub>10</sub> (NMP/100 ml)	Invierno	6.9 $\pm$ 0.2	6.75 - 7.07	6.6 $\pm$ 0.4	6.2 - 7.2
		Primavera	7.0 $\pm$ 0.1	6.92 - 7.04	6.4 $\pm$ 0.2	6.3 - 6.7

T: temperatura, CE: conductividad eléctrica, ORP: potencial de oxido reducción, DQO: demanda química de oxígeno, SST: sólidos suspendidos totales, PT: fósforo total, NT: nitrógeno total, CT: coliformes totales (NMP/100 ml) y E. Coli: Escherichia Coli (NMP/100 ml).

*Zantedeschia aethiopica* (conocida como Cala, Alcazaz, Cartucho, Lirio de agua) fue la especie de planta utilizada en las dos unidades experimentales de HC con una densidad de plantación de 4 individuos por metro cuadrado. Esta especie ha sido reportada previamente para uso en HC incluso en la Región del Maule (Sandoval et al., 2019; Vera-Puerto et al., 2021b), y se trata de una especie de tipo ornamental, con producción de flores, con el potencial de mejorar la estética de los HC evaluados.

### 2.3 Operación y estrategia de monitoreo

El sistema fue operado por 10 meses en total. Durante el primer mes (mayo), se realizaron pruebas hidráulicas y de funcionamiento del sistema. Las pruebas hidráulicas fueron llevadas a cabo para regular la entrada del flujo a 150 l/d a cada HC. Este caudal fue definido considerando un caudal medio de aguas residuales producido por un habitante equivalente para poblaciones inferiores a 2,000 habitantes en la zona sur del país (Vera, 2012). Dadas

las limitaciones de funcionamiento de la PTAS, donde el caudal de ingreso se entrega por bombeo, el sistema fue ajustado a una operación por pulsos, dividiendo el caudal de ingreso en seis pulsos por día, aplicados en jornada diurna. El segundo mes (junio), fue empleado como período de puesta en marcha. Este segundo mes (junio) se consideró como el inicio de operación real y estable del sistema. A partir del tercer mes (julio, semana cinco de operación), se empezó el período de monitoreo tomando muestras cada 20 días por un espacio de ocho meses, que incluyó las estaciones de invierno y primavera. Las muestras se tomaron en cuatro puntos del sistema

(Figura 1): a) punto de muestreo 1, afluente general, b) punto de muestreo 2, efluente del estanque regulador de flujo (posterior al sistema de decantación), y c) punto de muestreo 3 y 4, efluentes a las unidades de HC-FH y HC-FV. Para evaluar la calidad del agua se midieron los parámetros: pH, temperatura (T), conductividad eléctrica (CE), potencial de oxido reducción (ORP), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), fósforo total (PT), nitrógeno total (NT), coliformes totales (CT) (NMP/100 ml) y Escherichia Coli (E. Coli) (NMP/100 ml).

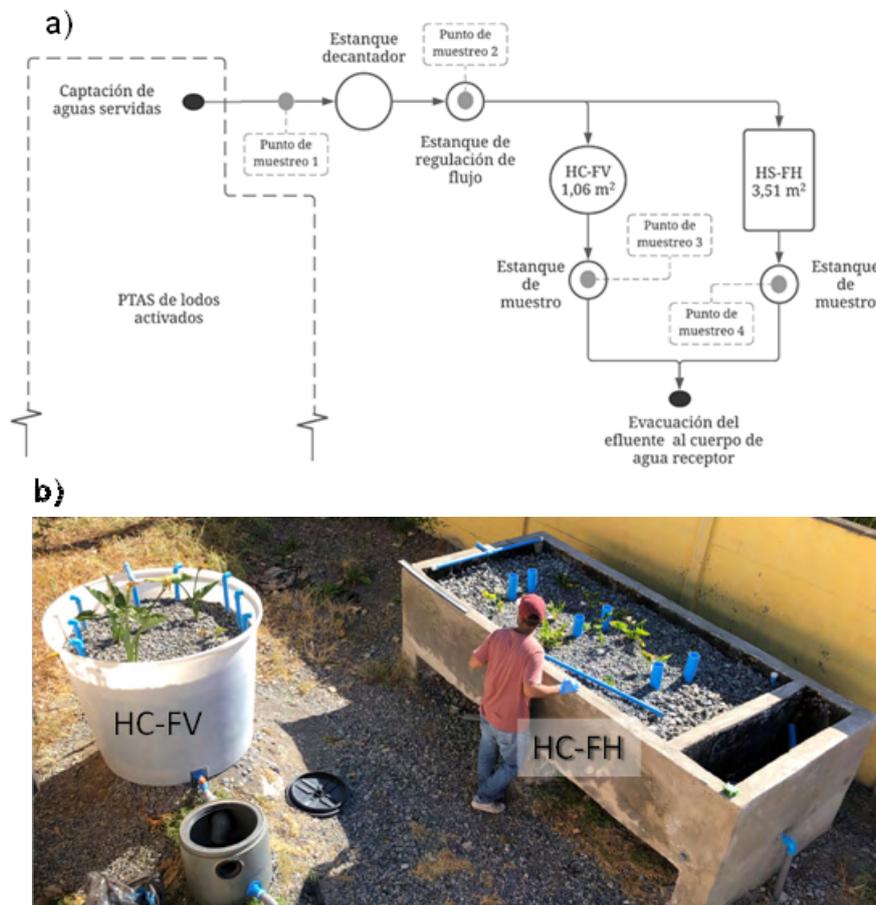


Figura 1. Sistema de tratamiento propuesto y localización de puntos de muestreo. a) Esquema del sistema experimental; b) vista de los humedales construidos: HC-FH, flujo horizontal, HC-FV, flujo vertical, a siete meses de su construcción

#### 2.4 Métodos analíticos

Los parámetros pH, T, CE, y ORP fueron medidos con electrodos calibrados, empleando el multiparamétrico HANNA modelo HI 98194. El parámetro SST fue determinado gravimétricamente mediante filtración por membranas de fibra de vidrio

fina, tamaño de poro 0.6  $\mu\text{m}$ , siguiendo el protocolo establecido en APHA-AWWA-WEF (2018). Por su parte, los parámetros DQO, PT y NT fueron medidos fotométricamente utilizando kits analíticos en el multiparamétrico HANNA modelo HI 83399. Los parámetros microbiológicos, CT y E. Coli fueron analizados utilizando el método Colilert (Dichter,

2011). Estos protocolos de monitoreo han sido empleados por Vera-Puerto et al. (2021b) y Vera-Puerto et al. (2021c).

### 2.5 Análisis estadístico

Para los análisis estadísticos de comparación de la calidad de los efluentes (HC-FH vs HC-FV) se utilizó el software estadístico INFOSTAT y un nivel de significancia de 0,05 (Di Rienzo et al., 2018). Se analizaron las concentraciones de SST, DQO, NT, PT, CT y E. Coli. Se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para determinar el tipo de test de comparación: a) datos con distribución normal, prueba t, y b) datos sin distribución normal, prueba de Wilcoxon (Vera et al. 2014; Araya et al., 2016).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Macro parámetros de calidad del agua efluente

La Tabla 2 resume los macro parámetros pH, T, CE, ORP para los efluentes a los dos humedales evaluados (HC-FH y HC-FV) dividido por estación climática. Respecto al pH, los efluentes a los dos

sistemas, presentan valores medios que oscilan entre 6.0 y 8.0, para las dos estaciones, sin mayores modificaciones respecto al afluente (Tabla 1). Estos valores de pH, se encuentran cercanos al valor intermedio de 7.0, y no deberían afectar los procesos de degradación de materia orgánica y nutrientes (Vera-Puerto et al., 2021b). Valores similares de pH han sido reportados tanto para HC-FH como HC-FV (Rojas et al., 2013; Zurita et al., 2009). Por su parte, para la temperatura, los valores medios se correlacionan con la estación, siendo en invierno alrededor de 13°C, mientras que los valores medios de primavera se encuentran alrededor de los 20°C. Al igual que con el pH, estos valores de temperatura no deberían afectar la eliminación de materia orgánica y nutrientes. En el caso de la CE, los valores medios son similares a los valores del afluente (Tabla 1), excepto para el HC-FV en la estación de primavera, donde la CE efluente, aumenta en más de un 50%. Una posible explicación para ello es la ocurrencia de un proceso de lixiviación o acumulación de compuestos en el estanque efluente de muestras al HC-FV.

Tabla 2. pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica (CE) y Potencial de Oxido-Reducción (ORP) por tipo de humedal y estación. (n=5 para cada estación)

Parámetro	Unidad	Estación	HC-FH		HC-FV	
			Promedio ± desviación estándar	Rango (Min-Max)	Promedio ± desviación estándar	Rango (Min-Max)
pH	Unidad	Invierno	7.8 ± 0.1	7.7 – 7.9	6.8 ± 0.3	6.4 - 7.1
		Primavera	7.9 ± 0.1	7.8 - 8.1	6.4 ± 0.4	6.0 – 7.0
T	°C	Invierno	12.9 ± 2.9	8.5 - 15.6	13.7 ± 2.6	10.3 - 15.8
		Primavera	20.1 ± 2.5	17.1 - 23.7	20.5 ± 2.9	17.0 - 24.6
CE	µs/cm	Invierno	621 ± 353	704 – 917	768 ± 371	159 – 1109
		Primavera	962 ± 308	775 – 1496	1558 ± 650	888 – 2511
ORP	mV	Invierno	+57.2 ± 72.4	-57.2 – +109.3	+153.5 ± 63.8	+40.9 - +192.7
		Primavera	+93.6 ± 44.6	+49.8 – +145.6	+230.4 ± 27.5	+191.0 – +262.7

HC-FH: flujo horizontal; HC-FV: flujo vertical

Finalmente, los valores de ORP muestran que ambos sistemas presentan valores medios por sobre +50 mV, aunque con mayor variabilidad en el caso de HC-FH. Este valor de ORP por el HC-FH, muestra que si bien puede considerarse un sistema anóxico (-100mV<ORP<+100mV) (Von Sperling, 2007; Faulwetter et al., 2009), han sido también reportados

como sistemas anaerobios (ORP<-200mV) (Rojas et al., 2013; López et al., 2015). Una posible explicación de esta mejora en las condiciones oxidativas, se relaciona con la reducción de la altura de operación en el HC-FH (0.4 m), ya que como lo explicó García et al. (2005), las condiciones bioquímicas pueden mejorar al reducir la altura típica

de 0.5 m. De otro lado, existe una diferencia de +100 mV en favor del HC-FV, resultado esperable, ya que este sistema en general, por su forma de operación y configuración, se considera más de tipo aerobio (ORP > +100 mV) (Brix & Arias, 2005; Vera-Puerto et al., 2021b).

### 3.2 Parámetros específicos de calidad del agua efluente

#### 3.2.1 Sólidos y materia orgánica

La Figura 2 presenta los valores medios y desviaciones estándar para los SST y la DQO para los dos tipos de HC evaluados (FH y FV). La Figura 2 muestra que los valores de SST siempre (incluida la variabilidad) se encuentran bajo los 20 mg/l. Sólo para la temporada de primavera fueron significativamente ( $p < 0.05$ ) mejores los valores medios efluentes al HC-FH. Además, se observa que existe una reducción en los valores medios efluentes a los dos sistemas de tratamiento en la estación de primavera, lo que se asocia, a una reducción del 50% en la concentración media afluente (Tabla 1). Pese a esto, el comportamiento obtenido para los sólidos, es el esperado para estos dos tipos de humedales, los que se han indicado, son efectivos en la eliminación de este parámetro (Brix & Arias, 2005; Rojas et al., 2013; Vera-Puerto et al., 2021b).

Respecto a la eliminación de materia orgánica medida como DQO, los valores medios no presentan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre los dos sistemas de tratamiento, para ninguna de las dos estaciones evaluadas. Para la estación de invierno, los valores medios de DQO se ubican alrededor de los 80 mg/l para los dos sistemas. Sin embargo, para la estación de primavera, se observa una reducción en las concentraciones efluentes al HC-FH con valores medios bajo los 60 mg/l, mientras que, en el sistema HC-FV, mantiene el valor medio del invierno. Este hecho puede explicarse en que para el HC-FH, después de la primera estación evaluada, se presenta un mayor desarrollo microbiano, responsable de la degradación de materia orgánica, y que puede asociarse, con que estos sistemas presentan un mayor tiempo de retención hidráulico ( $> 1d$ ) en comparación con el sistema de HC-FV ( $< 1d$ ). Además, puede explicarse en el hecho que el área unitaria considerada para el HC-FV de 1 m<sup>2</sup>/Hab. sea considerada baja, ya que en general, se ha documentado el uso de entre 3 y 5 m<sup>2</sup>/Hab-Equi. (Habitante-Equivalente) para este tipo de sistema en otras zonas geográficas como Dinamarca, Austria o Alemania (Dotro et al., 2017). Pese a lo anterior, ambos sistemas presentan concentraciones efluentes similares a valores reportados en la literatura (Rojas et al., 2013; Vera-Puerto et al., 2021b,c).

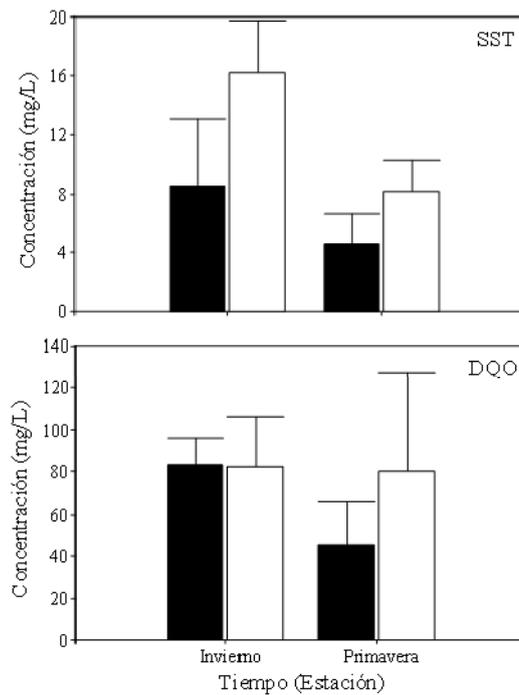


Figura 2. Concentración media efluente de SST y DQO por tipo de humedal y estación. HC-FH (■); HC-FV (□)

### 3.2.2 Macronutrientes

La Figura 3 presenta los valores medios y desviaciones estándar para el NT y PT para los dos tipos de HC evaluados (FH y FV). En el caso del NT tanto para la estación de invierno como de primavera existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre el HC-FH y HC-FV. Además, en el caso de las concentraciones efluentes del HC-FH, los valores medios de alrededor de 30 mg/l, se mantienen uniformes entre las dos estaciones, mostrando similitud con los valores del afluente (Tabla 1). Esto

indica que el HC-FH no posee condiciones para la eliminación de NT, lo que se explica, porque es un sistema principalmente de tipo anóxico (Tabla 2), donde no se produce nitrificación (transformación de amonio a nitrato) y no presenta condiciones para desnitrificación (transformación de nitrato en nitrógeno gas) (Brix et al., 2007; Dotro et al., 2017). Otros trabajos han llegado a la misma conclusión, mostrando que los HC-FH presentan limitación en el procesamiento del NT (Rojas et al., 2013; Leiva et al., 2018).

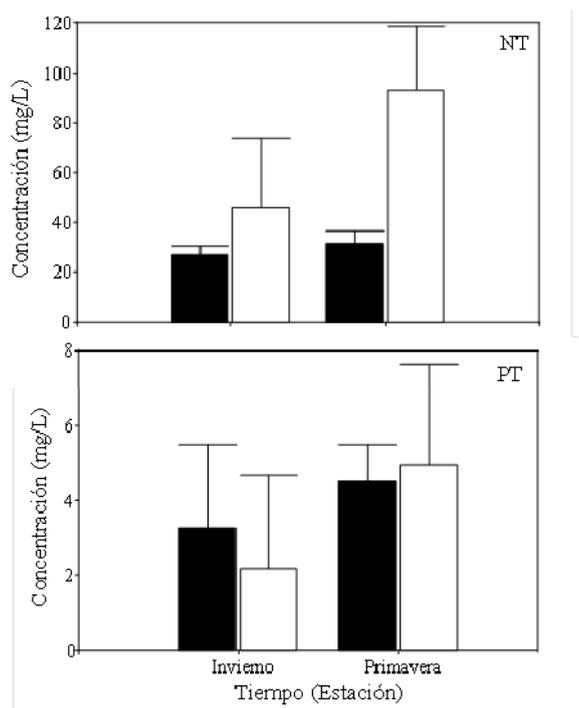


Figura 3. Concentración media efluente de NT y PT por tipo de humedal y estación. HC-FH (■); HC-FV (□)

Por su parte, el HC-FV presenta valores de concentración más altos que los valores medios del afluente (Tabla 1), lo que explica las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con el HC-FH. El incremento en las concentraciones efluentes al HC-FV se puede explicar en la acumulación de nitrato en el estanque de muestreo efluente. Los HC-FV han sido reconocidos como sistemas que poseen una buena capacidad de nitrificación, lo que en este caso se evidencia por los valores de ORP mayores a +100 mV (Brix & Arias, 2005; Vera-Puerto et al., 2021b).

Respecto al PT, no existen diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre los dos HC evaluados para las dos

estaciones evaluadas. Además, las concentraciones medias efluentes que varían entre 2 y 6 mg/l, son similares a los valores del afluente, lo que indica poca capacidad de procesamiento y eliminación por parte de los HC evaluados. Este resultado coincide con lo obtenido por Pandey et al. (2013), quienes evaluaron de forma comparativa el funcionamiento de HC-FH y HC-FV a diferentes cargas hidráulicas, que incluye el rango empleado en este estudio. En un HC el fósforo es eliminado principalmente por adsorción al medio de soporte (Vera et al., 2014).

Dado que los dos HC emplearon medios de soporte convencionales como grava en el HC-FH, y arena en

el HC-FV, que no poseen características especiales por ser inertes y con baja o nula capacidad de adsorción de fósforo, los resultados obtenidos fueron los esperables.

### 3.2.3 Microbiológicos

La Figura 4 presenta los valores medios y desviaciones estándar para los Coliformes Totales y *E. Coli* para los dos tipos de HC evaluados (FH y FV). Tanto para Coliformes Totales como *E. Coli*, se presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los dos HC únicamente durante la estación de invierno. En primavera, el HC-FV mejora su comportamiento medio, lo que permite que para esta estación no exista diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) con el HC-FH. En HC la eliminación de Coliformes Totales y los *E. Coli*, indicadores de presencia de organismos patógenos, se realiza por diferentes procesos como la muerte natural a causa de la inanición, la predación, la sedimentación, la filtración, el atrapamiento y adsorción, pero la filtración sería el principal mecanismo (Odinga et al., 2013). En este sentido, el HC-FV al usar arena como medio de soporte principal, necesita un mayor período de adaptación para el desarrollo de este

mecanismo de filtración y, además, los resultados mostrarían que un HC-FH, a pesar de usar medios de soporte de mayor tamaño que la arena (grava), el mayor tiempo de retención hidráulica ( $>1$  d), mostraría que en el mediano plazo de 6 meses, las concentraciones efluentes de los indicadores de presencia de organismos patógenos entre ambos sistemas sería similar.

Adrados et al. (2018) al estudiar la eliminación de *E. Coli* de forma comparativa entre HC-FH y HC-FV con más de 20 años y 2 años de operación, respectivamente, encontraron que los valores medios de los efluentes al HC-FV se encontrarían siempre bajo 3 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml, mientras que, el HC-FH presentaría valores medios por sobre 4 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml, correspondiéndose con lo descrito previamente. Finalmente, es importante señalar que, en el período de estudio, ambos sistemas presentan valores medios por sobre 4 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml y, en consecuencia, necesitan incorporar sistemas de desinfección para cumplir con las regulaciones de descarga en Chile y las normativas de reutilización, que en general, exigen valores bajo las 3 Log<sub>10</sub> NMP/100 ml (Vera et al., 2016).

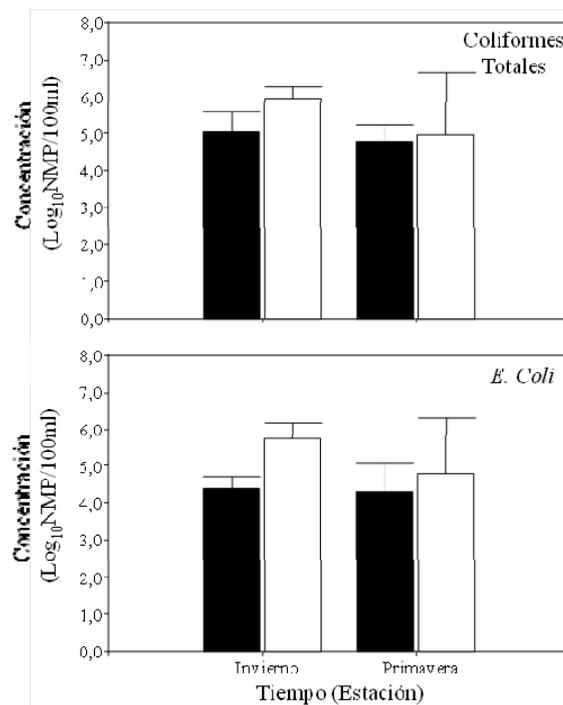


Figura 4. Concentración media efluente para Coliformes Totales y *E. Coli* por tipo de humedal y estación. HC-FH (■); HC-FV (□)

### 3.3 Evaluación del potencial de reutilización

La Figura 5 presenta la evolución temporal del pH y la CE en comparación con la normativa de reutilización italiana (Kalavrouziotis et al., 2015) y la normativa para agua de riego chilena NCh 1333 (INN, 1987). Es importante recalcar que la norma NCh 1333 es una norma que no considera el origen residual del agua como agua de riego, sin embargo, en la actualidad, es la normativa aplicada por el ente regulador en Chile para proyectos de riego con aguas residuales tratadas (Vera et al., 2016). Además, cabe señalar que esta normativa aplica si el efluente de los HC va directamente a riego. En caso que el efluente del HC no se reutilice en riego y, por el contrario, considere descargas a un cauce superficial, el efluente se deberá evaluar en función de la norma de emisión para la regulación de contaminantes

asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales DS 90/2000 (BCN, 2000). El pH en general se comporta estable a lo largo del tiempo en los dos HC. De los dos tipos de HC, el HC-FH presenta mejor estabilidad y comportamiento en el tiempo respecto al cumplimiento de las dos normativas utilizadas para comparación. En el caso del HC-FV, se observan valores inferiores a los del HC-FH, e incluso, un par de valores en el límite de 6 de la normativa italiana. Esto se explica por la capacidad de nitrificación de este sistema, lo que origina bajas en el pH. Por tanto, ambos HC presentan un comportamiento adecuado para reutilización en riego respecto al pH, pero en el caso de los efluentes al HC-FV, será necesario realizar seguimiento más exhaustivo para control de este parámetro.

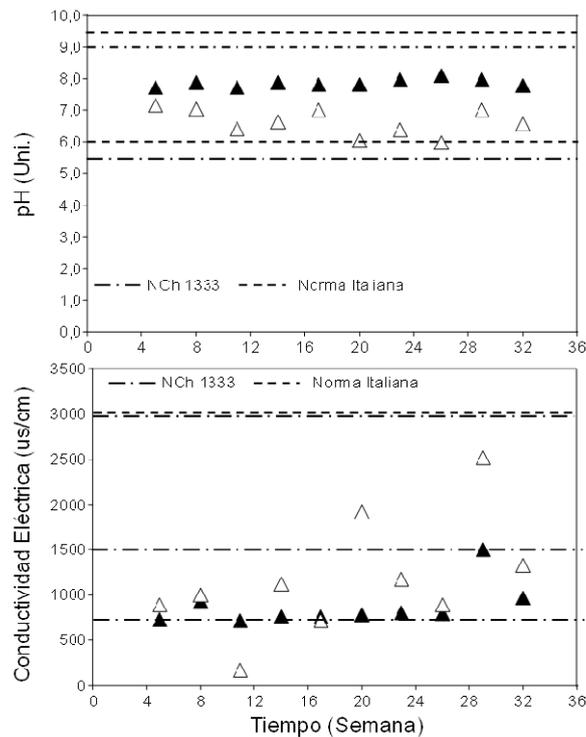


Figura 5. Evolución temporal del pH y la CE y comparativo con NCh 1333 (INN, 1987) y Norma Italiana (Kalavrouziotis et al., 2015). HC-FH (▲); HC-FV (Δ)

Respecto a la CE, los límites indicados en la Figura 5 se relacionan con restricciones al agua de riego señalando el tipo de cultivo que se vaya a regar. Las normativas, tal como lo señala Pedrero et al. (2010), normalmente coinciden en que valores de CE superiores a 3,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , consideren el agua con un

grado de restricción severo aplicable únicamente a cultivos tolerantes a la salinidad. La CE de ninguno de los dos sistemas de HC presenta valores por sobre ese límite.

Tabla 3. Comparativo de algunos parámetros de calidad de agua evaluados en efluentes para reutilización en Europa y Chile (Adaptado de Lavrnic et al., 2017).

Lugar / Clasificación	Parámetro de Calidad del agua					
	DBO <sub>5</sub>	DQO	SST	NT	PT	<i>E. Coli</i>
<i>Unión Europea (EU 2020/741) (CEC,2020)</i>						
A – Cultivos alimenticios que se consumen crudos donde la parte comestibles está en contacto con el agua y tubérculos	10	-	10	-	-	10
B - Cultivos alimentarios que se consumen crudos donde la parte comestible se produce por encima del suelo y no está en contacto con el agua, cultivos alimentarios procesados y cultivos no alimentarios, incluidos los utilizados para alimentar animales productores de leche o carne <sup>a</sup>	25	-	35	-	-	100
C – Cultivos alimentarios que se consumen crudos donde la parte comestible se produce por encima del suelo y no está en contacto con el agua, cultivos alimentarios procesados y cultivos no alimentarios, incluidos los utilizados para alimentar animales productores de leche o carne <sup>b</sup>	25	-	35	-	-	1000
D – Cultivos de carácter industriales, energéticos y para producción de semillas	25	-	35	-	-	10000
<i>Italia (Lavrnic et al., 2017)</i>						
I – Para riego excepto cuando los cultivos que van a ser consumidos crudos estarán en contacto con el agua y áreas con acceso al público	20	100	10	35	10	100 <sup>c</sup>
<i>Portugal (Lavrnic et al., 2017)</i>						
I – Cultivos que se consumen en estado crudo (sin cocción)	-	-	20-60	50 <sup>d</sup>	-	100
II – Áreas verdes con libre acceso al público	-	-	20-60	50 <sup>d</sup>	-	200
III – Cultivos alimenticios procesados, pastos, huertos y viñedos	-	-	20-60	50 <sup>d</sup>	-	1000
IV – Cultivos industriales, cereales, bosques y áreas verdes con control de acceso al público	-	-	-	-	-	10000
<i>Chile (INN, 2021)</i>						
A – Riego urbano sin restricciones y riego agrícola de cultivos alimenticios consumidos crudos	10	-	10	-	-	10 <sup>e</sup>
B – Riego urbano restringido y riego agrícola de cultivos alimenticios procesados	20	-	25	-	-	200 <sup>e</sup>
C – Riego agrícola de cultivos no alimentarios	35	-	50	-	-	1000 <sup>e</sup>
D – Riego restringido de cultivos industriales y sembrados	35	-	80	-	-	1000 <sup>e</sup>

A. Cualquier método de riego; B. Riego por goteo u otro método que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo; C. 80% de las muestras; D. Medido como N-NO<sub>3</sub>; E. 95% de las muestras

En el caso del HC-FH, los valores de CE serían más estable y se encontrarían entre los 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (límite para no causar ningún efecto en los cultivos) y los 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que lleva a clasificarla como agua con un grado de restricción moderado (Pedrero et al., 2010), y ser considerada como un “agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles” a la salinidad (INN, 1987). Para el HC-FV, existe una mayor dispersión en el comportamiento del CE, presentando un par de valores por sobre los 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , aunque acorde a Pedrero et al. (2010), se puede clasificar aún como agua con un grado de restricción moderado, pero sobre la cual al igual que el pH, requiere un mayor grado de control. Un punto específico es señalar que la diferencia presentada por el HC-FV se podría relacionar con la acumulación de nitrato señalada previamente, lo que indicaría que, en futuras operaciones de reutilización, se deben controlar los tiempos de retención del agua en los tanques de almacenamiento para riego.

La Tabla 3 presenta un resumen comparativo de diferentes normativas de reutilización. Incluye la directriz marco europea EU 2020/741 (CEC, 2020), las normativas de países con clima mediterráneo (similar al de la zona de implementación de los HC) y, además, incluye la NCh 3456 Parte 2 (INN, 2021), que se trataría de la reciente y primera normativa en Chile enfocada en la reutilización de aguas residuales para riego. Adicionalmente, muestra que la normativa promulgada en Europa, Portugal y Chile, otorga categorías al agua a reutilizar acorde al tipo de cultivo que se quiera regar. Además, la Tabla 3 muestra que todas las regulaciones coinciden en limitar contenidos de materia orgánica (aunque variando entre DBO5 y DQO), sólidos (SST) e

indicadores de organismos patógenos (E. Coli), pero no coinciden en la regulación de nutrientes.

La Tabla 4 resume la clasificación para reutilización en riego que puede ser entregada al agua efluente al HC-FH y HC-FV caracterizada en las Figuras 2, 3, 4 y 5, y tomando en cuenta para su clasificación, los valores definidos en la Tabla 3. La Tabla 4 incluye, en caso de no cumplir un parámetro o considerarse que se puede llegar a cumplir para una categoría, las necesidades tecnológicas que se requieren para tal fin. Puede notarse que en general se necesita incorporar un sistema de desinfección, que se debe ajustar a los valores máximos de concentración para indicadores de organismos patógenos que requiera cada categoría en la respectiva legislación. Además, dado que el parámetro evaluado para materia orgánica fue DQO y la mayoría de las legislaciones incluye la DBO5, se consideró que cuando la DQO media efluente al HC-FH o HC-FV fuera superior a 50 mg/l, sería necesario acoplar un segundo sistema de HC (horizontal o vertical) para poder alcanzar al menos valores de DBO5 por debajo de 20 mg/l.

Al respecto es importante señalar dos cosas: 1) en el caso del HC-FV probablemente con un aumento de área unitaria pasando de 1  $\text{m}^2/\text{Hab}$  a 3  $\text{m}^2/\text{Hab}$ , permita alcanzar los valores necesarios para cumplimiento de concentración en el efluente en cuanto a materia orgánica; 2) en caso de acoplamiento de un segundo sistema de HC, se hace necesario evaluar especialmente los valores de NT, ya que si se utiliza un HC-FV, este es un sistema con muy buena capacidad de nitrificación, con la consecuente formación de nitrato, la que como se argumentó previamente, puede acumularse en los depósitos definidos para almacenamiento del agua de riego.

Tabla 4. Clasificación otorgada al agua efluente a cada sistema de HC evaluado por cada una de las estaciones evaluadas

Tipo de Humedal	Estación	Lugar de Legislación			
		Unión Europea	Italia	Portugal	Chile
HC-FH	Invierno	B, C y D <sup>a,b</sup>	I <sup>a</sup>	I, II, III y IV <sup>a,c</sup>	B, C y D <sup>a,b</sup>
	Primavera	B, C y D <sup>a</sup>	I <sup>a</sup>	I, II, III y IV <sup>a,c</sup>	B, C y D <sup>a</sup>
HC-FV	Invierno	B, C y D <sup>a,b</sup>	-	I, II, III y IV <sup>a,d</sup>	B, C y D <sup>a,b</sup>
	Primavera	B, C y D <sup>a,b</sup>	-	IV	B, C y D <sup>a,b</sup>

A Debe incorporarse un sistema de desinfección. b Por el valor de DQO obtenido es probable que se necesite acoplar un segundo HC. c Se considera cumplimiento de NT, ya que se midió efectivamente el NT que incluye al N-NO3. d Importante evaluar los tiempos de almacenamiento para evitar el incremento del valor de NT

Los resultados de la Tabla 4 muestran que los efluentes al HC-FH tienen un mayor potencial de cumplimiento para clasificación con fines de reutilización tomando en cuenta las diferentes

normativas evaluadas. Si se toma específicamente la reciente norma aprobada en Chile para reutilización en riego de productos agrícolas (NCh 3456 Parte 2), tanto los efluentes al HC-FH como al HC-FV,

presentan una clasificación bastante similar. Pese a lo anterior, y dada la poca experiencia en el país reutilizando aguas tratadas, una recomendación general es ser cautelosos en una primera instancia, es decir, emplear los efluentes provenientes de los HC evaluados, y en general de cualquier sistema de tratamiento, tomando en cuenta las categorías C y D, las que no incluyen la producción de productos alimenticios. Una vez estudiados en mayor profundidad por parte de Universidades y Centros de Investigación, los efectos que se tiene sobre cultivos, suelos, y mayores detalles sobre otros elementos en el agua, como, por ejemplo, micro contaminantes, se debe avanzar en una segunda fase, a reutilizar los efluentes tomando en cuenta las categorías A y B, las que incluyen producción de alimentos. Esta segunda fase ayudará a aumentar la oferta de agua para satisfacer las necesidades alimentarias de la creciente población del país y del comercio agropecuario internacional, pero principalmente los sistemas de tratamiento como los HC evaluados en este trabajo, de mayor aplicación en zonas rurales, permitirían obtener una mayor seguridad de suministro de agua de riego, para el fomento de la agricultura familiar campesina.

#### **4. CONCLUSIONES**

Los dos sistemas de humedales construidos de tipo subsuperficial, horizontal y vertical, operados bajo el clima mediterráneo de la Región del Maule en Chile, mostraron similitud en el comportamiento de sus efluentes, presentando únicamente diferencias a medida que avanzó la estación de primavera para los parámetros DQO y NT. Esto significó que los efluentes del sistema horizontal, para los parámetros de calidad de agua evaluados en este trabajo, presentarán mayor grado de cumplimiento para ser clasificados en categorías de reutilización para riego. Pese a lo anterior, es claro que cualquiera sea la categoría de reutilización en que se enmarquen los efluentes tanto del sistema horizontal como vertical,

se deben acoplar sistemas de desinfección, los que se deben operar, tomando en cuenta el límite establecido para los organismos indicadores de patógenos en la categoría final de reutilización en que se vayan a utilizar los efluentes. En el caso específico de la reciente normativa chilena, los efluentes de ambos sistemas presentan un grado de clasificación similar, pero se recomienda en una primera etapa, dada la poca experiencia del país trabajando con aguas reutilizadas, ser enmarcados en categorías que no consideren la producción de alimentos. Finalmente, los resultados de este trabajo logran mostrar que los sistemas de humedales construidos subsuperficiales, horizontal o vertical, representan una solución tecnológica alternativa al tratamiento de las aguas servidas en las zonas rurales de clima mediterráneo en Chile, y que sus efluentes, tienen un alto potencial de ser reutilizados en actividades de riego, en un marco de economía circular, que contribuirá con la necesidad país de encontrar fuentes hídricas alternativas para desarrollar la agricultura, lo que es especialmente crítico, en zonas rurales como la Región del Maule.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad Católica del Maule, por su línea de financiamiento “Apoyo a la realización de tesis de postgrado”, y así mismo, al convenio de colaboración entre la Universidad de Talca (ejecutado por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, CTHA) y las organizaciones de usuarios del agua Río Claro, Río Lontué y Estero Carretón, quienes financiaron la realización de este proyecto.

Además, se agradece al apoyo en la analítica de calidad de agua entregado por el Proyecto ANID/FONDECYT/11180672.

#### **REFERENCIAS**

- Adrados, B., Arias, C., Pérez, L., Codony, F., Bécares, E., Brix, H., & Morató, J. (2018). Comparison of removal efficiency of pathogenic microbes in four types of wastewater treatment systems in Denmark. *Ecological Engineering*, 124(September), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.013>
- American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation (APHA-AWWA-WEF) (2018). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23th ed.; APHA-AWWA-WEF. Washington, DC, USA; Denver, CO, USA; Alexandria, VA, USA. ISBN 978-0875532875.

- Araya, F., Vera, I., Sáez, K., & Vidal, G. (2016). Effects of aeration and natural zeolite on ammonium removal during the treatment of sewage by mesocosm-scale constructed wetlands. *Environmental Technology*, 37(14), 1811–1820. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1133715>
- Avellán, T., & Gremillion, P. (2019). Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.024>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN) (2000). Decreto Supremo 90 de 2000. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Santiago de Chile.
- Brix, H., & Arias, C. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*, 25(5), 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.009>
- Brix, H., Schierup, H., & Arias, C. (2007). Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – what did we learn? *Water Science & Technology*, 56(3), 63–68. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.522>
- Commission of European Communities (CEC) (2020). Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. Bruselas.
- Dirección Meteorológica de Chile (MeteoChile). Productos históricos, Temperatura histórica anual de la estación General Freire (Curicó) (340031). [Consultado el 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/temperaturaHistoricaAnual/340031>
- Di Rienzo, J.; Casanoves, F.; Balzarini, M.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C. (2018) InfoStat [programa de cómputo]. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Dichter, G. (2011) IDEXX Colilert\*-18 and Quanti-Tray\* Test Method for the Detection of Fecal Coliforms in Wastewater. IDEXX Laboratories, Inc.. Westbrook, ME, USA.
- Donoso, G., Rivera, D. (2019). Desafíos del reúso de aguas residuales tratadas en Chile, 71-88. En *Gestión de aguas residuales: vertimiento, tratamiento y reutilización*. Séptimas Jornadas de Derecho de Aguas. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Dotro, G., Langergraber, O., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., Von Sperling, M. (Carlos Arias e Ismael L. Vera-Puerto Editores versión castellana) (2017). *Humedales para tratamiento*. IWA Publishing. Londres, Inglaterra. eISBN 9781789062526.
- Faulwetter, J., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M., Brisson, J., Stein, O. (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 35(6), 987–1004. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030>
- Fonder, N., & Headley, T. (2013). The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. *Ecological Engineering*, 51(2), 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.011>
- García, J., Aguirre, P., Barragán, J., Mujeriego, R., Matamoros, V., & Bayona, J. (2005). Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 25(4), 405–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.06.010>
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Instituto Nacional de Estadística de Chile (INE). Síntesis de resultados, Censo 2017. [Consultado el 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesisde-resultados-censo2017.pdf>.
- Instituto Nacional de Normalización (INN) (1987). Norma Chilena (NCh) 1333 Of. 78 Modificada 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (INN) (2021). Norma Chilena (NCh) 3456 Directrices para el uso de aguas residuales tratadas en proyectos de riego. Parte 2. Santiago de Chile.

- Kalavrouziotis, I., Kokkinos, P., Oron, G., Fatone, F., Bolzonella, D., Vatyliotou, M., Varnavas, S. (2015). Current status in wastewater treatment, reuse and research in some mediterranean countries. *Desalination and Water Treatment*, 53(8), 2015–2030. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.860632>
- Lavrnic, S., Zapater-Pereyra, M., & Mancini, M. (2017). Water Scarcity and Wastewater Reuse Standards in Southern Europe: Focus on Agriculture. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(7), 2–12. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3425-2>
- Leiva, A., Núñez, R., Gómez, G., López, D., & Vidal, G. (2018). Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater. *Ecological Engineering*, 120(May), 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.023>
- López, D., Fuenzalida, D., Vera, I., Rojas, K., & Vidal, G. (2015). Relationship between the removal of organic matter and the production of methane in subsurface flow constructed wetlands designed for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 83, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.037>
- Mena, M., Rojas, N., Zamorano, G., Peralta, F., Díaz, G., Aldunate, G., Recabarren, A. (2020). Informe Final, Mesa Eficiencia Hídrica, Sub-mesa reúso de aguas servidas tratadas y aguas grises tratadas. Ministerio de Obras Públicas de Chile.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP). Mesa Nacional del Agua: Primer Informe. [Consultado 31 de agosto de 2021]. Disponible en: [https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa\\_Nacional\\_del\\_Agua\\_2020\\_Primer\\_Informe\\_Enero.pdf](https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa_Nacional_del_Agua_2020_Primer_Informe_Enero.pdf).
- Nan, X., Lavrnić, S., & Toscano, A. (2020). Potential of constructed wetland treatment systems for agricultural wastewater reuse under the EU framework. *Journal of Environmental Management*, 275(February), 111219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111219>
- Odinga, C., Swalaha, F., Otieno, F., Ranjith, K., & Bux, F. (2013). Investigating the efficiency of constructed wetlands in the removal of heavy metals and enteric pathogens from wastewater. *Environmental Technology Reviews*, 2(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/21622515.2013.865086>
- Oficina de estudios y políticas agrarias (ODEPA). Panorama de la agricultura chilena. Ministerio de Agricultura. [Consultado el 31 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/panorama2019Final.pdf>.
- Pandey, M., Jenssen, P., Krogstad, T., & Jonasson, S. (2013). Comparison of vertical and horizontal flow planted and unplanted subsurface flow wetlands treating municipal wastewater. *Water Science and Technology*, 68(1), 117–123. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.220>
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J., Koukoulakis, P., & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture-Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, Vol. 97, pp. 1233–1241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>
- Rojas, K., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales construidos de flujo horiz. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 69, 289–299.
- Rodríguez, P. (2012). Saneamiento en el sector rural: en busca de opciones sostenibles. *Revista AIDIS Chile*, 42, 11-16.
- Rodriguez-Dominguez, M., Konnerup, D., Brix, H., & Arias, C. (2020). Constructed Wetlands in Latin America and the Caribbean: A Review of Experiences during the Last Decade. *Water*, 12(6), 1744. <https://doi.org/10.3390/w12061744>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Sandoval, L., Zamora-Castro, S., Vidal-Álvarez, M., & Marín-Muñoz, J. (2019). Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Applied Sciences*, 9(4), 685. <https://doi.org/10.3390/app9040685>
- Subsecretaría de Desarrollo Rural de Chile (Subdere). Resumen catastro plantas de tratamiento de aguas servidas - Sector rural. [Consultado 30 de abril de 2015]. Disponible en:

[https://bibliotecadigital.subdere.gov.cl/?\\_%20ga=2.15711862.1716703321.%201627500562-215413543.1627500562](https://bibliotecadigital.subdere.gov.cl/?_%20ga=2.15711862.1716703321.%201627500562-215413543.1627500562)

- Vera, I., García, J., Sáez, K., Moragas, L., & Vidal, G. (2011). Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities. *Ecological Engineering*, 37(2), 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.031>
- Vera, I. (2012). Análisis de funcionamiento y patrones asociativos de sistemas de tratamiento convencionales y naturales de aguas servidas para la eliminación de materia orgánica y nutrientes. Tesis Doctoral, Universidad de Concepción, Concepción, Región del Biobío, Chile.
- Vera, L., Martel, G., & Márquez, M. (2013). Two years monitoring of the natural system for wastewater reclamation in Santa Lucía, Gran Canaria Island. *Ecological Engineering*, 50, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.001>
- Vera, I., Araya, F., Andrés, E., Sáez, K., & Vidal, G. (2014). Enhanced phosphorus removal from sewage in mesocosm-scale constructed wetland using zeolite as medium and artificial aeration. *Environmental Technology*, 35(13), 1639–1649. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.877984>
- Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(3), 19–35.
- Vera-Puerto, I., Olave, J., Tapia, S., & Chávez, W. (2019). Atacama Desert: water resources and reuse of municipal wastewater in irrigation of cut flower aeroponic cultivation system (first laboratory experiments). *Desalination and water treatment*, 150, 73–83. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23612>
- Vera-Puerto, I., Olave-Vera, J., Tapia, S., Chávez, W., & Arias, C. (2020). Reuse of Treated Municipal Wastewater from Constructed Wetlands for Cut Flowers Irrigation in Aeroponic Cultivation. *Ingeniería y Universidad*, 24. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued24.tmwr>
- Vera-Puerto, I., Valdes, H., Bueno, M., Correa, C., Olave, J., Carrasco-Benavides, M., Schiappacasse, F., & Arias, C. (2021a). Reclamation of Treated Wastewater for Irrigation in Chile: Perspectives of the Current State, Opportunities, and Challenges. *Science of the Total Environment* (Submitted).
- Vera-Puerto, I., Escobar, J., Rebollo, F., Valenzuela, V., Olave, J., Tijero-Rojas, R., Arias, C. (2021b). Performance comparison of vertical flow treatment wetlands planted with the ornamental plant *Zantedeschia aethiopica* operated under arid and mediterranean climate conditions. *Water (Switzerland)*, 13(11), 1478. <https://doi.org/10.3390/w13111478>
- Vera-Puerto, I., Valdés, H., Correa, C., Perez, V., Gomez, R., Alarcon, E., & Arias, C. (2021c). Evaluation of Bed Depth Reduction, Media Change, and Partial Saturation as Combined Strategies to Modify in Vertical Treatment Wetlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4842. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094842>
- Villamar, C.-A., Vera-Puerto, I., Rivera, D., & De la Hoz, F. (2018). Reuse and Recycling of Livestock and Municipal Wastewater in Chilean Agriculture: A Preliminary Assessment. *Water*, 10(6), 817. <https://doi.org/10.3390/w10060817>
- Von Sperling, M. (2007). *Basic Principles of wastewater treatment*. IWA Publishing. Londres, Inglaterra. eISBN 9781780402093.
- Zhang, D., Jinadasa, K., Gersberg, R., Liu, Y., Ng, W., & Tan, S. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries – A review of recent developments (2000–2013). *Journal of Environmental Management*, 141, 116–131. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.015>
- Zurita, F., De Anda, J., & Belmont, M. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(5), 861–869. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



## Variaciones de área y volumen del sistema glaciar San Francisco (1955-2020), a partir de imágenes satelitales y ley de potencias, Cuenca del Río Maipo

*Area and volume variations of the San Francisco glacier system (1955-2020), from satellite images and power law, Maipo River Basin*

Solange Margarita Jara Ortega\*<sup>1</sup> Gino Casassa Rogazinski<sup>2</sup>

Recibido: 29/09/2021

Aceptado: 05/10/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El retroceso de las masas glaciares, se ha vinculado a los efectos del cambio climático. Lo anterior, es especialmente preocupante en la zona central de Chile, derivado que una parte importante de los cauces son alimentados por el derretimiento glaciar en el verano; pese a esto, la investigación en este ámbito es acotada, y este estudio pretende aportar una metodología inicial que pueda ser utilizada en estudios complementarios y que tengan como propósito gestionar mejor este recurso. Este trabajo centra su análisis en la subsubcuenca del río Volcán, en San José de Maipo, Región Metropolitana, Chile, específicamente en la porción de hielo que ocupa el Glaciar San Francisco (SF), y los glaciaretos (1, 2 y 3) y Mirador del Morado (MM). Estos cuerpos de hielo se estudian de forma espacio temporal en el periodo comprendido entre los años 1955-2020. Para ello, se cuantificó el área glaciar a partir de imágenes satelitales (Landsat-7, Landsat-8 OLI y Sentinel-2) y fotografías aéreas (vuelo hycon-55), y con posterioridad estimar la variación de sus volúmenes sobre la base de ecuaciones empíricas del tipo ley de potencias, propuestas por autores como Chen y Ohmura (1990) y Bahr et al. (1997), entre otros. Los resultados evidencian una disminución sostenida y significativa de área y volumen para todos los cuerpos glaciares contenidos en el sistema de estudio. Esta variación negativa corresponde al 70% de área original, lo que se traduce en la pérdida de superficie de todas las masas de hielo en estudio, en función del tiempo. Por otra parte, todas las estimaciones de volumen a partir de las expresiones matemáticas propuestas, presentan una clara caída advirtiendo la disminución de sus volúmenes en función del tiempo.

**Palabras clave:** Variación de Área, Variación de Volumen, Glaciares, ley de potencias

### Abstract

*This research focuses its analysis on the sub-basin of the Volcan River, in San José de Maipo, RM. Specifically in the portion of ice that occupies the San Francisco Glacier (SF), glaciers SN (1, 2 and 3) and Mirador del Morado (MM). These ice bodies were studied in a space-time way between 1955-2020. To do this, the glacier area was quantified from satellite images (Landsat-7, Landsat-8 OLI and Sentinel-2) and aerial photographs (hycon-55 flight), and subsequently, the variation of its volumes was estimated based on empirical equations of the power law type, proposed by authors such as Chen and Ohmura (1990) and Bahr et al. (1997), among others. The results show a sustained and significant decrease in area and volume for all the glacial bodies contained in the study system. This negative variation corresponds to 70% of the original area, which translates into the loss of surface of all the ice masses under study, as a function of time. At the same way, all volume estimates based on the proposed mathematical expressions show a clear drop, and the decrease in their volumes as a function of time.*

**Keywords:** Area Variation, Volume Variation, Glaciers, power law

1 Universidad de Talca, Chile

2 Unidad de Glaciología y Nieves, Dirección General de Aguas, DGA, Chile

## 1. INTRODUCCIÓN

En términos de almacenamiento de agua, los glaciares son importantes fuentes de reserva y regulación de caudales, pero como consecuencia del cambio climático, se han evidenciado alteraciones en el ciclo hidrológico sin precedentes en cientos de miles de años. En varias regiones del mundo las precipitaciones y la sequía se han intensificado. El incremento de la temperatura ha generado grandes impactos como el continuo incremento en el nivel del mar. El aumento en el deshielo del permafrost, el derretimiento de glaciares, la disminución de la capa de hielo estacional y la pérdida de hielo marino en el Ártico en verano, son solo muestras de los cambios que ya se están produciendo y que no podrán ser revertidos sino hasta dentro de varios siglos o quizás milenios (IPCC, 2021). Para el caso de Chile, en los últimos 30 años, los patrones de retroceso y adelgazamiento glaciar se han acelerado y duplicado. Este fenómeno sería explicado por el calentamiento de la atmósfera durante el siglo XX y lo que va del siglo XXI (BCN, 2016). De este modo, los glaciares contenidos en los Andes centrales, para el caso de Chile, adquieren un papel fundamental de abastecimiento de agua, del que depende gran parte de la población que habita la Región Metropolitana, donde se ubica Santiago, la ciudad capital de Chile. Solo el río Maipo atiende cerca del 70% de la demanda actual de agua potable de la región, y con una superficie de 15,304 km<sup>2</sup>, abastece cerca de un 90% de las demandas de regadío (DGA, 2004). Sin embargo, el potencial almacenamiento de este recurso en su forma glacial, cobra aun mayor relevancia, si se considera el aumento de los periodos de sequía en la última década y cómo la preservación de esta reserva hídrica podría mitigar estos impactos (Garreaud et al. 2017). En este sentido, da la impresión que de la combinación de aumentos de temperatura y la declinación de las precipitaciones, ha resultado un ascenso de la línea de nieves, que explicaría algunos cambios glaciares (Carrasco et al., 2011), aunque se estima que existen otros factores no-climáticos incidiendo en su detrimento. Entre estos factores, la intervención antropogénica de estas masas de hielo producto de la gran minería en la zona, son hechos únicos a nivel mundial y fueron estudiados por primera vez por los autores Brenning, A. y, Azócar G.F. en el año 2008, convirtiéndose en un factor limitante adicional, y que, junto a los cambios en el clima, han mermado el equilibrio en los regímenes hidrológicos, la mantención de

distintos ecosistemas, el consumo humano, y las actividades productivas, entre otras. El esfuerzo que hay que hacer en este sentido, es ampliar el campo de investigación hacia todas aquellas relaciones que permitan establecer un vínculo entre la pérdida de masa de hielo y cómo esto influye en la producción de agua en las cuencas, pues la seguridad hídrica de la región está en juego (Bocchiola, et al. 2018). Para ello, en este trabajo, se realiza la caracterización espacio-temporal de cuerpos de hielo circunscritos a la subsubcuenca del río Volcán, ubicada en la comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana de Chile. El sistema glaciar en estudio lo conforman cinco cuerpos de hielo, donde la masa predominante es la que ocupa el glaciar San Francisco. El objetivo principal de este trabajo es determinar entre los años 1955-2021, los cambios que han experimentado estas masas glaciales en torno a su área y a partir de ello definir las variaciones en el cálculo de sus volúmenes, a través de una forma empírica utilizada en el mundo por diversos autores que proponen leyes de potencias para relacionar estas variables (Huenante, 2018). Se busca con dichas experiencias, ajustar el cálculo a las singularidades de este territorio, a las limitantes e incertidumbres del mapeo de los cuerpos de hielo, a la calidad de las imágenes satelitales y al ojo discriminador, con el fin de generar insumos que puedan ser consultados en estudios y escenarios futuros.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

Prácticamente la totalidad del territorio de la región Metropolitana es comprendido por la cuenca del río Maipo, ubicada entre los paralelos 32°55'-34°15' latitud sur y meridianos 69°55'-71°33' longitud oeste. El río Maipo tiene una longitud de 250 km y abastece una superficie de 15.304 km<sup>2</sup>, atendiendo alrededor del 70% de la demanda actual de agua potable de la región y cerca de un 90% de las demandas de riego (DGA, 2004).

### Río Volcán

El río Volcán, formado por los deshielos del Volcán San José (5,821m), es un afluente cordillerano andino del Maipo, y tiene un trayecto que recorre los poblados de Baños Morales, El Volcán, Queltehues y Romeral. Desemboca en el río Maipo a la altura de San Gabriel, donde se une con el río el Yeso. En toda la subsubcuenca es posible apreciar un marcado

régimen nival, con caudales mayores en época estival, producto de los deshielos cordilleranos y caudales menores en los meses invernales. En esta zona, se emplaza el estudio con particularidad en la subsubcuenca del río Volcán (figura 1), denominada Glaciar San Francisco, al norte de Baños Morales en lo que corresponde al monumento natural El Morado

y que constituye un área silvestre protegida bajo la custodia de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Entre los 1850 m y los 450 m se encuentran contenidos cinco cuerpos glaciares que conforman el sistema glaciar en estudio. Estos son el Glaciar San Francisco, SN1, SN2, SN3, y Mirador del Morado.

### SUBSUBCUENCA Y MICROCUENCA RIO VOLCÁN

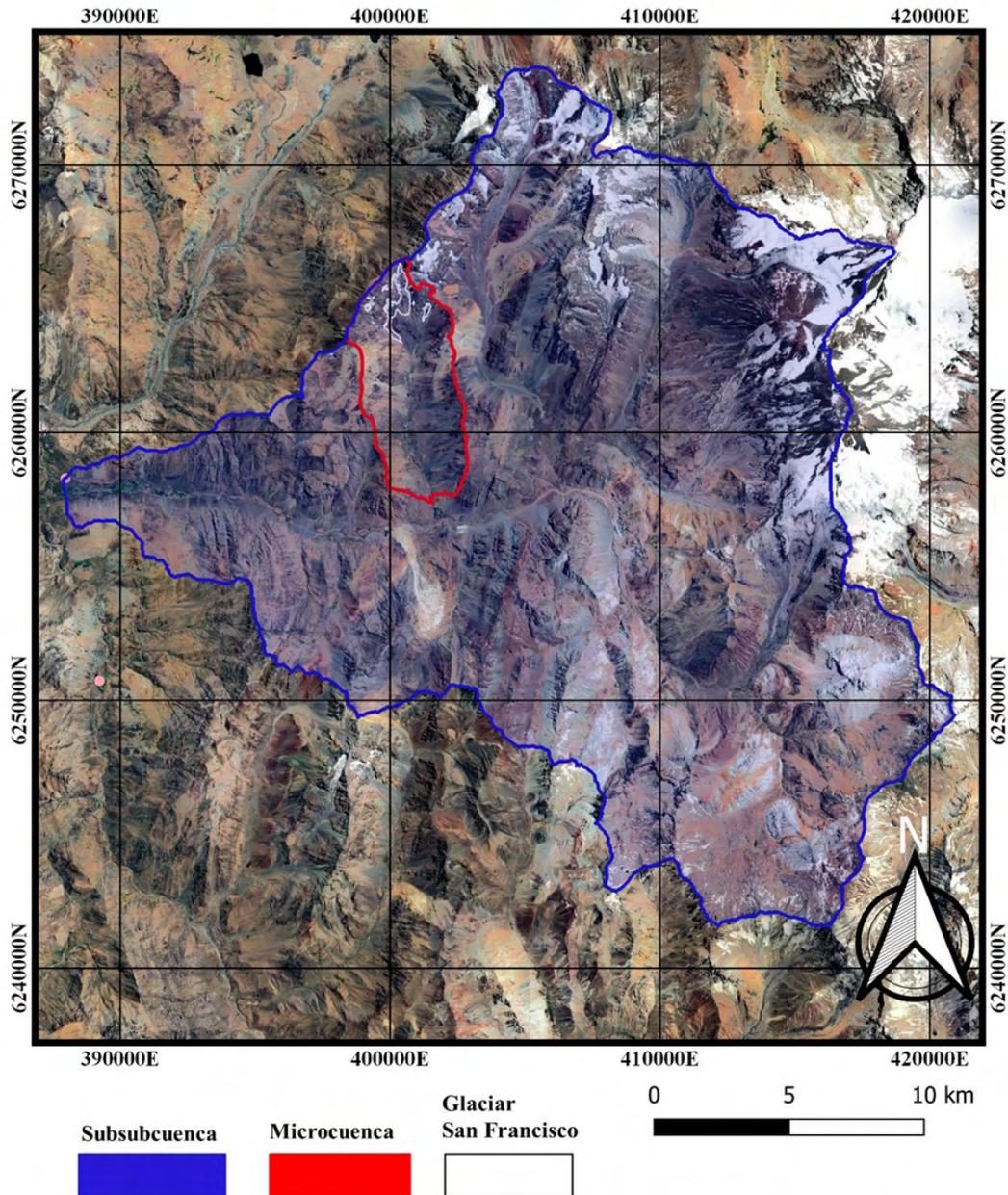


Figura 1. Área de estudio

## 2.2 Captura de datos

### Superficie glaciar

Desde el USGS (United States Geological Survey), se descargó un set de imágenes satelitales enmarcadas en la zona de estudio para los distintos años, con el propósito de delimitar la superficie glaciar y posteriormente estimar la variación de ésta en el periodo de estudio. Estas fueron imágenes Landsat7 ETM+ para los años 200-2003, Landsat8-OLI para los años 2013-2015 (ambos sets de imágenes tratados en una combinación de bandas RGB 753 y 754 recomendado por UGN), y Sentinel-2 para los años 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, tratadas en una combinación de bandas RGB 843. Particularmente el año 1955, fue procesado a partir de fotografías aéreas correspondientes al vuelo HYCON, que fueron georreferenciadas para los mismos fines. La periodicidad de los satélites y la calidad de imágenes multiespectrales y pancromáticas definieron el proceso.

## 2.3 Procesamiento

### Áreas

El primer paso en la elaboración de cálculo de áreas del sistema glaciar, consiste en delimitar a través de una capa vectorial (shp) el polígono correspondiente al cuerpo de hielo de interés. Para ello fue necesaria la descarga de imágenes satelitales (Landsat7 ETM+, Landsat8-OLI Sentinel-2) a través de la plataforma online Earthexplorer de USGS. Los criterios de selección de dichas imágenes fueron principalmente, la baja cobertura de nubes y nieve en el periodo estudiado (periodo estival, meses febrero- marzo-abril). Para cada año se descargó un set de al menos tres imágenes satelitales que fueron tratadas en una combinación de bandas (RGB) 753-754 (Natural con corrección atm) para Landsat y 843 (falso color) para Sentinel. Posterior a ello y usando las imágenes corregidas (+banda pancromática 1,5 m de resolución espacial), a través del software Qgis, se delimitó el contorno del sistema glaciar para los distintos años y se calculó su área. Sin embargo, respecto a los criterios de delimitación de glaciares, la resolución de imágenes Landsat (30 metros para bandas multiespectrales y 15 para banda pancromática) y Sentinel (20 metros para bandas multiespectrales y 10 para banda pancromática), no permitía distinguir en algunos casos y de forma clara los márgenes del glaciar en estudio, debido a la presencia de sombras intensas en algunos lugares de la imagen guía. Por

este motivo se recurrió a la función imágenes históricas de Google Earth y en Qgis a la función BaseMap como apoyo. Los años de estudio para los cuales se descargaron estas imágenes son: 2000 Landsat7 ETM+, 2003 Landsat7 ETM+, 009 Landsat8-OLI, 2015 Landsat8- OLI, 2016 Sentinel-2, 2017 Sentinel-2, 2018 Sentinel-2, 2019 Sentinel-2 y, 2020 Sentinel-2. Por otra parte, para el año 1955 la UGN facilitó un set de fotografías aéreas no rectificadas, del vuelo HYCON, donde dos de ellas, correspondían a la zona de interés. Estas fueron tratadas con el georreferenciador del software Qgis, y una vez rectificadas, se usaron de base para el mapeo de contorno del glaciar en ese año. Sin embargo, adicional a lo anterior fue necesario contar con ortofotos que fueron facilitadas por la UGN para contrastar singularidades en el terreno, lo que fue delimitado como masa glaciar. De igual forma se elaboraron además otros insumos a partir de los DEMs, tales como mapa dependiente, mapa de sombras (Hillshade), y áreas de control (Zonas donde no existe variación entre periodos, hitos y rocas). Una vez demarcadas todas las áreas del sistema glaciar y para los años de estudio, se obtienen las diferencias de superficie entre periodos y se estima con estos insumos el volumen asociado a cada año.

### Volúmenes

Para poder estimar el volumen del sistema glaciar a partir de las áreas, se recurrió a la literatura. Varios autores proponen ecuaciones empíricas que relacionan área y volumen de glaciares de todo el planeta. Los autores Chen y Ohmura (1990) obtienen una relación entre área y volumen para glaciares alpinos a través de radio eco sondaje y perfiles sísmicos. Bahr et al. (1997), en cambio, proponen una ecuación ajustada a las características de forma de un glaciar, como su ancho, largo, profundidad y condiciones de borde para el cálculo de su volumen. Radic y Hock (2010), por su parte, luego de analizar cerca de 123,000 glaciares exponen una formula derivada de un método estadístico que calcula volúmenes de hielo a nivel global y local. En tanto, autores más recientes, como Huss y Farinotti (2012) proponen una ecuación validada en más de 300 glaciares de distintas partes del mundo; asimismo, Grinsted (2013), distingue subgrupos de cuerpos de hielo, hasta 25 km<sup>2</sup> o mayores logrando una estimación también a nivel global. Por último, Huenante (2018), el único autor chileno, estudia 18 glaciares de la zona central de los Andes, con la

finalidad de proponer un modelo que pueda ser adaptado a las condiciones de la cordillera chilena. Estos estudios son hoy muy relevantes, pues permiten usar sus resultados como referencia para el cálculo de volúmenes de masas de hielo. A continuación de describen las seis ecuaciones utilizadas para tales efectos:

Chen y Ohmura (1990), obtienen una fórmula empírica entre la relación Área/Volumen para glaciares alpinos, a través de la medición de estas variables con radio eco sondaje y perfiles sísmicos (Chen y Ohmura, 1990).

Bahr et al. (1997), ajustan ecuaciones concluyendo que el volumen de un glaciar depende del producto de sus características de forma, tales como el ancho, el largo y la profundidad, además de sus condiciones de borde.

Radic y Hock (2010), luego de analizar cerca de 123.000 glaciares, exponen un método estadístico que deriva volúmenes de hielo a nivel global y regional.

Huss y Farinotti (2012), presentan una nueva aproximación al cálculo del espesor de hielo, validando sus resultados en más de 300 glaciares en distintas partes del mundo.

Grinsted (2013), realiza una nueva estimación de volumen de hielo glaciar a nivel global. Para ello calculó distintos subgrupos de cuerpos de hielo, entre los cuales destacan casquetes de hielo y glaciares mayores a 25 km<sup>2</sup>, y glaciares de tamaño menor a 25 km<sup>2</sup>.

Huenante (2018), luego de analizar detalladamente 18 glaciares de la zona central de los Andes, propone un modelo que se adapte a las condiciones de la cordillera chilena.

Tabla 1. Leyes de potencias

Chen y Ohmura (1990) Ecuación 1	$V = 28,5S^{1.35}$
Bahr et al. (1997) Ecuación 2	$V = 27,6S^{1.375}$
Radic y Hock (2010) Ecuación 3	$V = 36,5S^{1.35}$
Huss y Farinotti (2012) Ecuación 4	$V = 28,4028S^{1.327}$
Grinsted (2013) Ecuación 5	$V = 28,4028S^{1.327}$
Huenante (2018) Ecuación 6	$V = 2,45S^{1.27}$

$$V = C * S^Y \quad (1)$$

Donde

- V Volumen de un glaciar en base al área de su superficie (Hm<sup>3</sup>)
- S Superficie glaciar (km<sup>2</sup>)
- C, Y Constantes empíricas

### 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Variación en área

Los resultados permiten obtener de forma gráfica una variación negativa constituyendo esto una disminución del área de todos los cuerpos glaciares en estudio. Particularmente el área varía un 70% respecto al área original en el periodo estudiado entre los años 1955-2020. Por tanto, todas las masas de hielo consideradas en el sistema pierden superficie a lo largo del tiempo. Dicha información es corroborada a través del test Mann Kendall, el que arroja valores negativos significativos para todos los

cuerpos de hielo en el periodo de estudio, demostrando una caída sostenida en los valores, y por ende se traduce en una caída de la superficie glaciar en función del tiempo. Se observa, además, un quiebre positivo el año 2013, representado en azul en la Figura 3 y que se aleja de la línea de tendencia, o que posiblemente puede ser explicado como un error en la delimitación del área para ese año, pues algunas imágenes utilizadas como insumo para la delimitación presentaban deficiencias en su calidad, producto de zonas de sombras fuertes. No obstante, cabe considerar que pueda tratarse de un leve incremento superficial, tal y como puede ocurrir para otros casos de glaciares en Chile y el mundo.

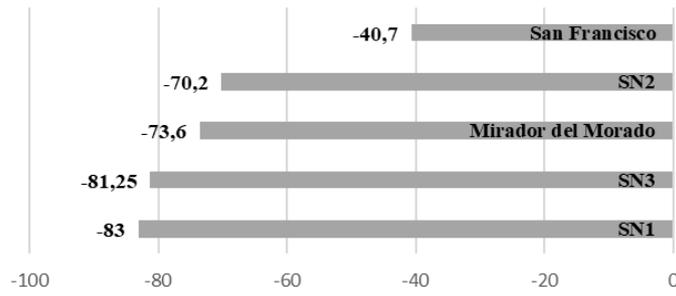


Figura 2. Variación anual de área periodo 1955-2020

### VARIACION AREAL SISTEMA GLACIAR 1955 Y 2020

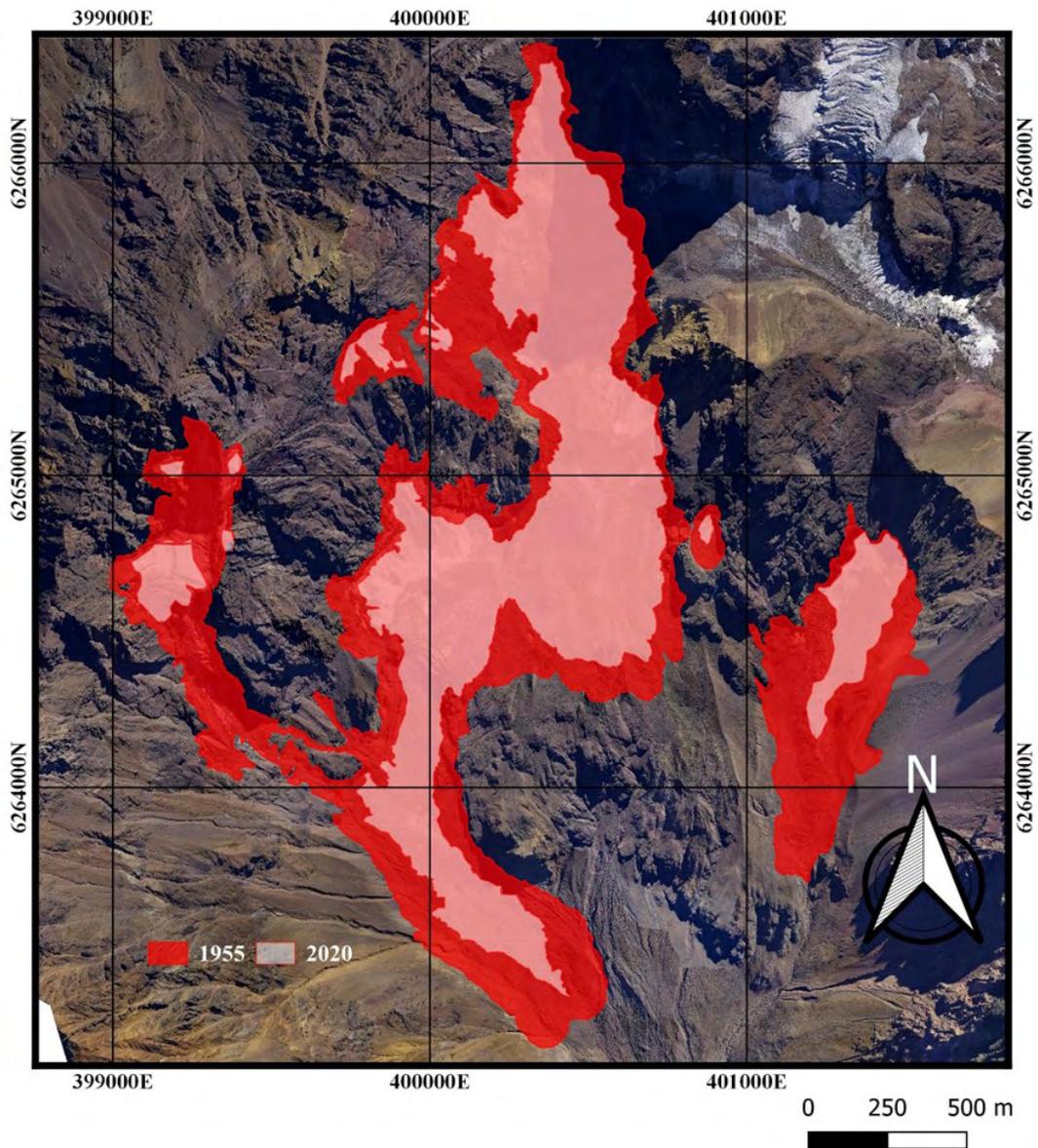


Figura 3. Variación de área

Tabla 2. Resultados Mann-Kendall para Área glaciar (1955-2020)

Glaciar	Variable	Z	Valor p
SF	Área	-4.20*	2.62E-05
MM		-4.20*	2.62E-05
SN1		-3.27*	1.08E-03
SN2		-4.14*	3.49E-05
SN3		-3.92*	8.99E-05

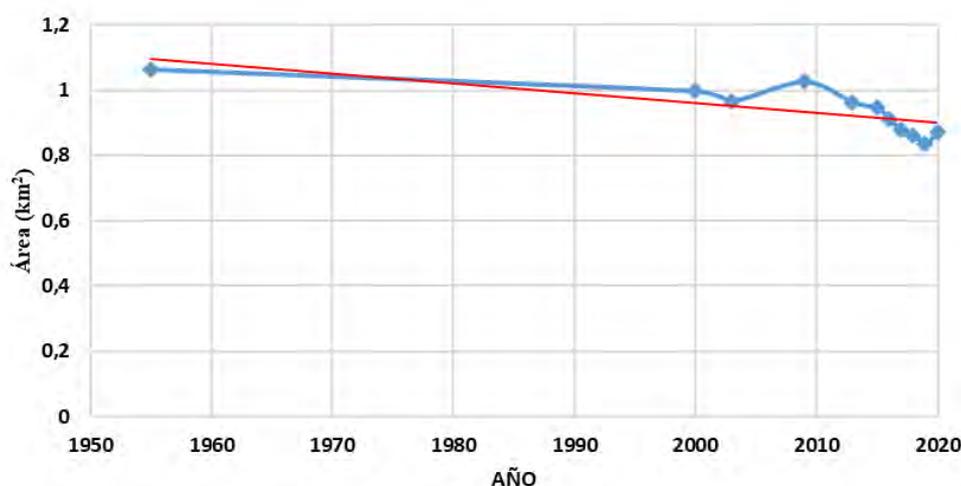


Figura 4. Variación anual de Área glaciar (1955-2020)

Tabla 3. Estimación de volumen

Año	Área (km <sup>2</sup> )	Ec. 1 (1990) (Hm <sup>3</sup> )	Ec. 2 (1997) (Hm <sup>3</sup> )	Ec. 3 (2010) (Hm <sup>3</sup> )	Ec.4 (2012) (Hm <sup>3</sup> )	Ec. 5 (2013) (Hm <sup>3</sup> )	Ec. 6 (2018) (Hm <sup>3</sup> )
1955	1.064	47.979	46.601	62.538	46.396	63.963	34.529
2000	0.997	42.632	41.391	55.439	41.388	57.815	31.038
2003	0.967	40.244	39.066	52.275	39.145	55.038	29.466
2009	1.026	40.73	39.527	52.82	39.729	56.43	30.078
2013	0.962	39.354	38.198	51.085	38.323	54.095	28.912
2015	0.946	37.895	36.776	49.148	36.955	52.426	27.961
2016	0.91	35.591	34.534	46.11	34.772	49.629	26.403
2017	0.878	33.323	32.326	43.115	32.629	46.92	24.883
2018	0.862	31.921	30.961	41.256	31.314	45.307	23.966
2019	0.836	30.098	29.187	38.853	29.587	43.106	22.735
2020	0.871	27.718	26.856	35.608	27.472	41.193	21.461

### 3.2 Variación en volumen

Como se señaló, se probaron las fórmulas propuestas por diversos autores, para calcular el volumen de hielo de cada cuerpo glaciar a partir de su área, obteniéndose lo que se presenta en la tabla 3. De lo anterior, se desprende que los valores más bajos de estimación, son los entregados por la fórmula de Huenante. Esto ocurre porque el autor propone un ajuste de volumen de hielo para glaciares de Chile, equivalente a los Andes Centrales. Sin embargo, los valores obtenidos de los otros 5 autores son primeras aproximaciones utilizadas de forma global para el

cálculo de volúmenes de hielo en otras zonas geográficas del mundo y permiten una aproximación al cálculo. Pero lo medular es que, se distingue para todas las expresiones aplicadas, una notoria caída en términos de volumen para todo el sistema glaciar en estudio, como lo muestra la figura 5. Lo anterior se ve corroborado por la prueba estadística de tendencia Mann-Kendall, aplicada a los volúmenes obtenidos para las distintas fórmulas. Esta se manifiesta en caídas, sostenidas y significativas en el tiempo, con valores-Z menores a -1.96, lo que equivale a un nivel de significancia del 5%.

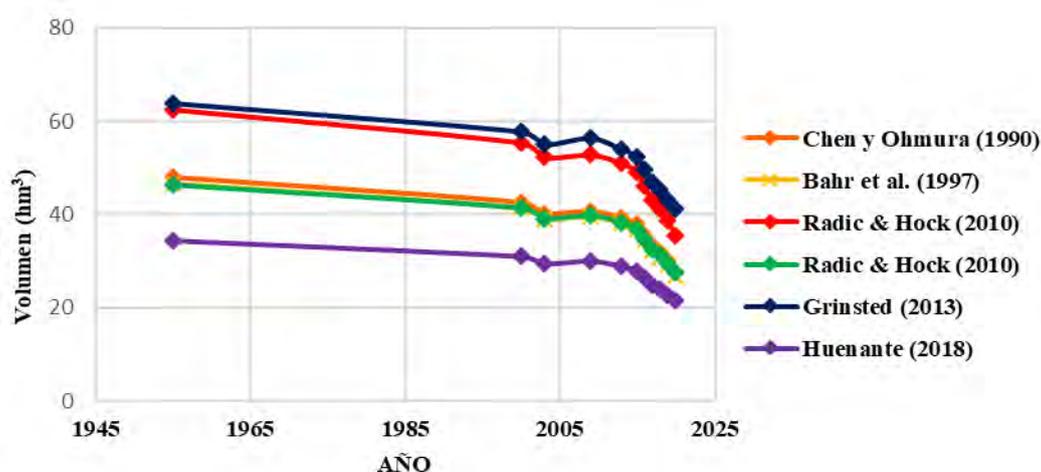


Figura 5. Estimación de volumen para el sistema glaciar (1955-2020)

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Área

- El sistema glaciar en estudio conformado por los glaciares San Francisco, Mirador del Morado, SN1, SN2 Y SN3, presenta una disminución en su área de 61.2%, equivalente a la reducción de 0.922 km<sup>2</sup> de superficie total para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciar San Francisco presenta una disminución de 66.6% en su área, equivalente a la reducción de 0.576 km<sup>2</sup> de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciar Mirador del Morado presenta una disminución de 51.9% en su área, equivalente a la reducción de 0.15 km<sup>2</sup> de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.

- El glaciarete SN1 (glaciarete >0.0025 km<sup>2</sup>), presenta una disminución de 46.2% en su área, equivalente a la reducción de 0.154 km<sup>2</sup> para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciarete SN2 (glaciarete >0.0025 km<sup>2</sup>), presenta una disminución de 32.6% en su área, equivalente a la reducción de 0.031 km<sup>2</sup> de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciarete SN3 (glaciarete >0.0025 km<sup>2</sup>), presenta una disminución de 31.3% en su área, equivalente a la reducción de 0.005% de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.

### Volumen

- Chen & Ohmura: un volumen de 71.2 km<sup>3</sup> para el año 1955 y de 38.6 km<sup>3</sup> para el año

- 2019, lo que se traduce en la disminución de un 54.3% del volumen total del sistema.
- Bahr et al.: un volumen de 69 km<sup>3</sup> para el año 1955 y de 37.4 km<sup>3</sup> para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 54.2% del volumen total del sistema.
  - Radic & Hock: un volumen de 91.6 km<sup>3</sup> para el año 1955 y de 49.4 km<sup>3</sup> para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 53.9% del volumen total del sistema.
  - Huss & Farinotti: un volumen de 70.5 km<sup>3</sup> para el año 1955 y de 38.6 km<sup>3</sup> para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 54.8% del volumen total del sistema.
  - Grinsted: un volumen de 105.8 km<sup>3</sup> para el año 1955 y de 60 km<sup>3</sup> para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 56.7% del volumen total del sistema.
  - Huenante: un volumen de 55 km<sup>3</sup> para el año 1955 y de 30.8 km<sup>3</sup> para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 55.9% del volumen total del sistema.

Tabla 4. Resultados Mann-Kendall para la estimación de volúmenes (1955-2020)

Glaciar	Volumen	Z	Valor p
San Francisco	Chen & Ohmura	-4.20*	3.00E-05
	Bahr et al.	-4.20*	3.00E-05
	Radic &Hock	-4.20*	3.00E-05
	Huss & Farinotti	-4.20*	3.00E-05
	Grinsted	-4.20*	3.00E-05
	Huenante	-4.20*	3.00E-05
Mirador Del Morado	Bahr et al.	-4.20*	3.00E-05
	Radic &Hock	-4.20*	3.00E-05
	Huss & Farinotti	-4.20*	3.00E-05
	Grinsted	-4.20*	3.00E-05
SN1	Huenante	-4.20*	3.00E-05
	Chen & Ohmura	-3.27*	1.00E-03
	Radic &Hock	-3.27*	1.00E-03
	Huss & Farinotti	-3.27*	1.00E-03
SN2	Grinsted	-3.27*	1.00E-03
	Huenante	-3.27*	1.00E-03
	Chen & Ohmura	-4.14*	3.00E-05
	Bahr et al.	-4.14*	3.00E-05
SN3	Huss & Farinotti	-4.14*	3.00E-05
	Grinsted	-4.14*	3.00E-05
	Huenante	-4.14*	3.00E-05
	Chen & Ohmura	-4.00*	9.00E-05
	Bahr et al.	-4.00*	9.00E-05
	Radic &Hock	-4.00*	9.00E-05
	Huss & Farinotti	-4.00*	9.00E-05
	Grinsted	-4.00*	9.00E-05
	Huenante	-4.00*	9.00E-05

SF: San Francisco, MM: Mirador del Morado, SN: Sin Nombre.

El análisis del comportamiento de las áreas durante el periodo en estudio, permite constatar que existe una disminución sostenida y significativa de la superficie en el tiempo de todos los cuerpos glaciares que conforman el sistema San Francisco, y se ve corroborado a través del test de tendencias de Mann Kendall para todas las ecuaciones utilizadas en la estimación de volumen en función del área glaciar.

Por otra parte, los efectos en la disminución del área vinculan de forma directa la pérdida de volumen de las masas de hielo, pues la aplicación de todas las funciones matemáticas a las que se recurrió para estimar el volumen del sistema, definió un decrecimiento sostenido y significativo durante el periodo 1955-2020.

En términos de retroceso, no es posible definir en base a los resultados de este estudio, cuál o cuáles son los factores que lo controlan, sin embargo, para estudios posteriores debería contarse con parámetros climáticos, precipitaciones, caudales, balance de

masa, balance de energía, y línea de nieves, entre otros, los que podrían ayudar a explicar simultáneamente a qué factores responde el ritmo de este retroceso y si existe sincronidad en ello respecto a otros cuerpos glaciares vecinos.

Por último, este estudio puede ser usado como insumo para la elaboración del balance de masa del sistema glaciar San Francisco y como referencia en la validación de volúmenes de hielo equivalentes en agua que se obtengan de dicho cálculo, respecto a los volúmenes calculados en esta investigación.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo, quisieran agradecer a la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas, por el apoyo en la realización de la memoria de pregrado que dio pie para la elaboración de este artículo.

### REFERENCIAS

- Bahr, D.; Meier, M.; Peckham, S. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 102 (B9): 20355-20362. <https://doi.org/10.1029/97JB01696>
- BCN (Biblioteca del Congreso Nacional). (2016). Informe Glaciares de Chile. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones, Asesoría Técnica Parlamentaria 281 (3-4): 242-268
- Bocchiola, D.; Soncini, A.; Senese, A. y Diolaiuti G. (2018). Modeling hydrological components of the Rio Maipo of Chile, and their prospective evolution under climate change. *Department of Environmental Science and Policies, Università di Milano, Italy* 6 (3):57. <https://doi.org/10.3390/cli6030057>
- Carrasco, J., Casassa, G., Pizarro, R., Saravia, M. (2011). "Impactos del Cambio Climático, Adaptación y Desarrollo en las Regiones Montañosas de América Latina". DOI:10.13140/RG.2.1.2926.6804
- Casassa, G.; Apeim, A.; Bustamante, M.; Marangunic, C.; Salazar, C., & Soza, D. (2015). Contribución Hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del Río Maipo. XIV Congreso Geológico Chileno, 768-772.
- Castillo, Y. (2015). Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del Río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado. Tesis para optar al grado de Magister Universidad de Chile. Santiago, Chile. 54p.
- Chen, J.; Ohmura, A. (1990). Estimation of alpine glacier water resources and their change since the 1870s. in *Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990. Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, Switzerland.* 127-135.
- DGA (Dirección General de Aguas). (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad cuenca del rio Maipo.
- Farinotti, D.; Huss, M.; Bauder, A.; Funk, M. (2009). An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change* 68: 225-231.
- DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.05.004

- Grinsted, A. (2013). An estimate of global glacier volume. (en línea). *The Cryosphere* 7: 141–151.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307–6327, <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>, 2017.
- Huenante, J. (2018). Procesamiento y análisis de radio eco-sondaje (RES) sobre glaciares chilenos: Relación entre volumen de hielo y área superficial. Tesis para optar al grado de Magister. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 103p.
- Huss, M.; Farinotti, D. (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. (en línea). *J. Geophys. Res.* 117: F04010. Disponible en <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JF002523>
- IPCC, (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Rivera, A.; Casassa, G.; Acuña, C.; Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. (en línea). *Investig. Geogr. Chile* 34:29-60.
- Radic, V., Hock, R. (2010). Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal Of Geophysical Research, Earth Surface*.
- Segovia, A.; Videla, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. Tesis para optar al grado de Magister. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 24p.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



## Diseño eficiente de Sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales para su aplicación en zonas con demandas crecientes

*Efficient design of rainwater harvesting systems in rural areas for application in areas with increasing demands*

Claudia Sangüesa Pool<sup>1\*</sup>, Carlos Vallejos Carrera<sup>2</sup>

Recibido: 29/09/2021

Aceptado: 09/11/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) son sistemas que permiten la captura y almacenamiento de las aguas lluvia durante la época lluviosa para su uso posterior, ya sea para riego, para los animales, para combatir incendios, para consumo doméstico e incluso como agua potable. En el actual escenario de incertidumbre climática reflejada en una mega-sequía que afecta a la zona central de Chile surge la necesidad de buscar nuevas fuentes de agua. Por ello, se planteó el estudio de los SCALL en distintas zonas del país, con el objetivo de determinar estándares de diseño y construcción que permitan satisfacer las demandas crecientes de agua en zonas rurales. En este documento se presentan los resultados obtenidos para las regiones de Valparaíso y del Maule en distintos estudios iniciados en el año 2012. Como resultado se determinó que el uso de la precipitación anual ajustada a la función de distribución de probabilidad de Gumbel con una probabilidad de excedencia del 0.9 fue adecuada para el diseño de las obras. A la vez, se determinó que los mejores materiales son el uso de geomembrana en el área de captación y el uso de estanque flexible como hidroacumulador, y ello considerando la facilidad en la instalación, se mantiene la calidad del agua y presenta la mejor relación costo/beneficio en términos hidrológicos y económicos. Así se recomienda el uso de estos sistemas para subsanar la escasez de agua para familias rurales con fines de uso doméstico y agrícola.

**Palabras clave:** Captación de aguas lluvias, distribución de probabilidad, Gumbel, Hidroacumulador, Precipitación de diseño

### Abstract

*Rainwater harvesting systems (SCALL) are systems that allow the capture and storage of rainwater during the rainy season for later use, either for irrigation, for animals, to fight fires, for domestic consumption and even as drinking water. In the current scenario of climatic uncertainty reflected in a mega-drought that affects the central zone of Chile, the need arises to look for new sources of water. For this reason, the study of SCALL in different areas of the country was proposed, with the aim of determining design and construction standards that allow meeting the growing demands for water in rural areas. This document presents the results obtained for the Valparaíso and Maule regions in different studies started in 2012. As a result, it was determined that the use of annual precipitation adjusted to the Gumbel probability distribution function with a probability of the 0.9 exceedance was adequate for the design of the works. At the same time, it was determined that the best materials are the use of a geomembrane in the catchment area and the use of a flexible tank as a hydroaccumulator, and this considering the ease of installation, the water quality is maintained and has the best cost/benefit ratio in hydrological and economic terms. Thus, the use of these systems is recommended to remedy the water shortage for rural families for domestic and agricultural purposes.*

**Keywords:** Rainwater harvesting, Gumbel, probability distribution function, designer rain, Hydroaccumulator

1 Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca. claudiasanguesa@gmail.com

2 Independiente. cvallejoscarrera@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde las antiguas civilizaciones confeccionaban obras para captar el agua lluvia y luego conducirla a un estanque acumulador o directamente a obras de riego. Así, se han encontrado evidencias de obras de más de 4000 años, destinadas a la captura y uso de aguas lluvia en diversas partes del mundo, lo que permite concluir que estas obras han cumplido una función importante en actividades agrícolas y domésticas, especialmente para las regiones áridas y semiáridas del planeta. No obstante lo anterior, en Chile estas tecnologías se han comenzado a desarrollar y a publicar recientemente, y responden a la necesidad de aumentar la disponibilidad de agua durante la época estival. Y ello cobra cada vez mayor importancia dado el escenario de incertidumbre climática que se observa en la zona central del país, reflejado en una sequía que afecta al consumo humano, a las actividades productivas y al medioambiente (Valdés-Pineda et al., 2020; Sangüesa et al., 2018). En este sentido, se plantean interrogantes acerca de como diseñar y construir estos sistemas de tal forma de optimizar la oferta de agua; por ejemplo, cómo obtener la precipitación de diseño que dé seguridad en la captura de cierto volumen de agua en un territorio con una alta variabilidad en las precipitaciones. O qué materiales se pueden utilizar para obtener una mejor relación costo/beneficio. En este marco, el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) de la Universidad de Talca comenzó a desarrollar los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) en la Región del Maule, a partir del año 2012, con financiamiento del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC Maule). Y posteriormente, se han desarrollado e implementado SCALL en otras

regiones del país, tales como Coquimbo, Valparaíso, Ñuble, Biobío y Los Ríos, con proyectos financiados a través de distintos fondos públicos concursables. En el primer estudio desarrollado en la Región del Maule a partir del 2012 se evaluó el diseño en base a una precipitación definida para cada sitio, y se evaluaron distintas opciones de materiales y de construcción de los SCALL (Unesco, 2015; Pizarro et al., 2016). Luego, en los proyectos posteriores se pudo evaluar el diseño en otros territorios del país y su aplicabilidad para uso agrícola (Fernández et al., 2017). Los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) son sistemas que permiten la captura y almacenamiento de las aguas lluvia para su uso posterior, ya sea para riego, para los animales, para combatir incendios, para consumo doméstico e incluso como agua potable (García-Chevesich et al., 2015). Los SCALL están conformados por una zona de captación, un sistema de conducción y un hidroacumulador (Figura 1). La zona de captación corresponde a una zona impermeabilizada implementada sobre la ladera de un cerro. También puede utilizarse el techo de alguna construcción (casa, bodega, galpón) teniendo el cuidado de que el techo no altere la calidad del agua (por ejemplo, que no esté oxidado). Un segundo componente del SCALL está dado por el sistema de conducción, que lleva el agua capturada hacia el hidroacumulador. Se puede incluir un sistema de decantación o filtros si fuese necesario. Un tercer elemento corresponde al hidroacumulador, que es donde se almacena el agua lluvia, y para ello, existen diversas alternativas, tales como estanque australiano, de PVC, de fibra de vidrio y estanques flexibles (Unesco, 2015; Pizarro et al., 2016; Fernández et al., 2017)..

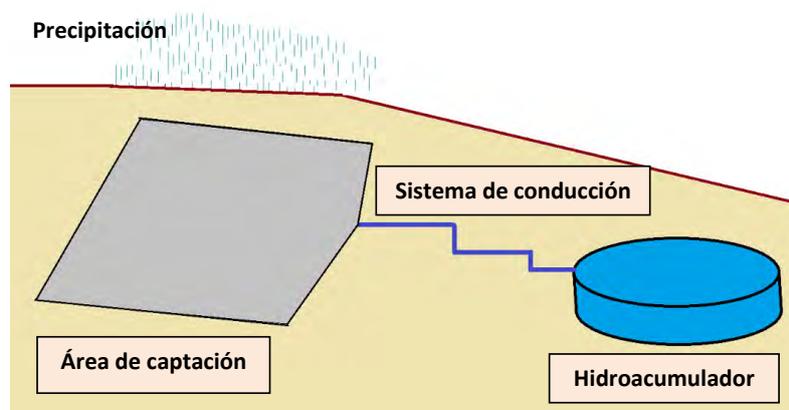


Figura 1. Representación esquemática de un Sistema de captación de aguas lluvias

En el presente artículo se muestra la metodología desarrollada e implementada por el CTHA en los distintos proyectos, para el diseño y construcción de los SCALL con el objetivo de definir un diseño eficiente y aplicable a distintas zonas del país.

## 2. METODOLOGÍA

En el diseño del SCALL se considera, por un lado, las características hidrológicas del sitio, con el objetivo de determinar las dimensiones del área de captación y el volumen de agua a almacenar, y por otro, los materiales a utilizar, con el fin de lograr una adecuada relación costo/beneficio. A continuación, se muestran los pasos que se siguieron para determinar los elementos que propician un diseño eficiente.

### 2.1 Diseño Hidrológico

#### *Precipitación de Diseño*

##### *Selección de Estación Pluviométrica*

Un primer paso en el diseño de los SCALL consiste en definir la precipitación de diseño, a partir de la cual se realizarán los cálculos para el dimensionamiento de sus partes. Para ello, se deben seleccionar estaciones pluviométricas cercanas a los sitios donde se ubicarán los sistemas. Es deseable que las estaciones posean un registro de al menos 15 años lo que permite mayor certeza en los análisis estadísticos. Esto con el fin de garantizar que el diseño de la obra esté acorde a la precipitación del

lugar. Si faltasen registros de precipitaciones mensuales y, de superar estas el 10 % del total, se recomienda utilizar el método de completación por promedios históricos (Pizarro et al., 2009).

#### *Tratamientos estadísticos*

Para cada sitio seleccionado se debe definir la precipitación de diseño la que se calcula a través de funciones de distribución de probabilidad. De esta forma se obtiene la probabilidad de excedencia la que se define como la probabilidad de que un valor de la variable aleatoria (en este caso, la precipitación anual) sea excedido. Se encuentra asociada al periodo de retorno, siendo este definido como el tiempo que transcurre entre dos eventos o sucesos de similares características.

#### *Ajuste a función de distribución de probabilidad (FDP)*

Una vez definida la estación, la serie de precipitación anual obtenida fue ajustada a una (FDP) con el fin de obtener la precipitación de diseño en términos de la probabilidad de ocurrencia asociada a un periodo de retorno. Se utilizaron diversas FDP tales como, Log Normal, Gumbel, Pearson tipo III, Goodrich y Gamma. No obstante, la experiencia desarrollada en Chile para datos anuales de precipitación señala que la FDP más adecuada es la de Gumbel por su capacidad de ajuste en distintos periodos (Pizarro et al., 2018; Pizarro y Novoa, 1986). A continuación, se detallan las FDP utilizadas.

#### *Función de Gumbel*

La siguiente expresión define la función de distribución acumulada de Gumbel:

$$F(X) = e^{-e^{-d*(X-\mu)}} \quad (1)$$

donde

- x Valor de la variable aleatoria (precipitación de diseño)
- d y  $\mu$  Parámetros de la función que deben ser ajustados
- e Constante de Neper

Los parámetros de la distribución de una muestra de tamaño infinito se estiman en base a la media aritmética y a la desviación estándar de la muestra, lo

que simplifica su cálculo. Estos parámetros se calculan de la siguiente forma:

$$d = \frac{1}{0.779696 * S} \quad (2)$$

$$\mu = \bar{x} - 0.450047 * S \quad (3)$$

### Función de Goodrich

Esta FDP posee la característica de eliminar valores extremos, es decir, aquellos cuya probabilidad de ocurrencia es muy pequeña. Por lo mismo, consigue

suprimir las distorsiones que pueda provocar un solo valor anómalo (Pizarro y Novoa, 1986). La función de distribución acumulada de Goodrich se define mediante la siguiente expresión:

$$P(x \leq X = F(X)) = 1 - e^{-\alpha(X-X_1)^{1/p}} \quad (4)$$

Para  $x_1 < x \leq \infty$

donde

X Valor de la variable aleatoria  
 $\alpha, p$  y  $X_1$  Parámetros a estimar a partir de los valores de la muestra

En tanto, los parámetros se determinan a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{m_3}{S^3} = P(p); \quad (5)$$

$$\alpha^{2p} = \frac{1}{S^2} [\Gamma(2p + 1) - \Gamma^2(p + 1)] \quad (6)$$

$$X_1 = \bar{X} - \frac{\Gamma(p + 1)}{\alpha^p} \quad (7)$$

$$m_3 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^3}{n} \quad (8)$$

donde

$m_3$  Momento central de orden tres  
 $S^3$  Desviación típica al cubo  
 $P(p)$  Función auxiliar de Goodrich  
 $S^2$  Varianza muestral  
 $\Gamma$  Función Gamma  
 $\bar{X}$  Media muestral

La función auxiliar de Goodrich permite estimar para este caso la expresión  $m^3/S^3$ , a través de la cual es

posible determinar  $p$ , con ayuda de la tabla Valores de la Función  $P(p)$  auxiliar de Goodrich.

### Distribución Log-Normal

$$F(x) = \frac{1}{2\pi\alpha(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - a}{\beta}\right)^2} dx \quad (9)$$

Donde los parámetros se estiman en base a los logaritmos de la variable aleatoria, como se muestra a continuación:

$$a = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad (10)$$

$$\beta = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - a)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

donde

- $\chi$  Representa el valor a asumir por la variable aleatoria
- $\alpha, \beta$  Parámetros de la función a estimar
- $e$  Constante de Neper

En el mismo caso que la distribución normal, se asigna  $z$  como una variable estandarizada.

$$z = \frac{\ln x - a}{\beta} \quad (12)$$

Y la probabilidad se encuentra en la tabla Normal, donde el valor de la variable  $x$  es

$$x = e^{\beta z + a}$$

*Distribución Pearson Tipo III*

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)^{\beta-1} dx \quad (13)$$

Los parámetros de la distribución se estiman en función de la media aritmética ( $\bar{x}$ ) y la desviación estándar ( $S$ ) de la muestra, a través de las siguientes expresiones

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}} \quad (14)$$

$$\beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2 \quad (15)$$

$$\delta = \bar{x} - \alpha\beta \quad (16)$$

donde

- $e$  Constante de Neper
- $\alpha, \beta, \delta$  Parámetros
- $S$  Desviación típica
- $\bar{x}$  Media aritmética

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{n}}{S^3} \quad \text{Coeficiente de sesgo}$$

La variable estandarizada y se presenta a continuación

$$y = \frac{x - \delta}{a} \quad (17)$$

Posteriormente, el ajuste se realiza a través de la tabla chi-cuadrado, donde

$$x^2 = 2y \quad (18)$$

$$\mu=2\beta \tag{19}$$

Por lo tanto, el valor que asume la variable aleatoria  $x$  a partir de lo anteriormente señalado se define como  $x = ya + \delta Y$  la probabilidad es obtenida a través de los valores presentes en la tabla de percentiles de la distribución chi cuadrado con  $n$  grados de libertad.

*Pruebas de bondad del ajuste*

Estas pruebas tienen como objetivo evaluar la calidad del ajuste de los datos a las respectivas FDP. Existen diversas pruebas, pero en hidrología son muy utilizados el Coeficiente de Determinación  $R^2$  y el test de Kolmogorov-Smirnov.

El test Kolmogorov-Smirnov permite verificar la hipótesis de que cierta muestra procede de una distribución particular. Para ello se debe determinar la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada y obtener el valor absoluto de la máxima diferencia entre ambas, para luego utilizar la expresión de Weibull. El coeficiente de determinación  $R^2$ , por su parte, señala la proporción de la variación total de las frecuencias observadas que es explicada por las frecuencias teóricas acumuladas (Pizarro y Novoa, 1986). Se define mediante la siguiente expresión.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(F_n(X))_i - F(X)_i)^2}{\sum(F_n(X))_i - \overline{F_n(X)}_i)^2} \tag{20}$$

donde

- $R^2$  Coeficiente de determinación  $0 \leq R^2 \leq 1$
- $F_n(X)_i$  Frecuencia observada acumulada
- $F(X)_i$  Frecuencia teórica acumulada
- $\overline{F_n(X)}_i$  Media de las Frecuencias observadas acumuladas

*Determinación de la precipitación de diseño*

Con la FDP ajustada y validada se determinará la precipitación de diseño en base a una probabilidad de ocurrencia dada. Para ello, se obtiene el valor de la variable “ $x$ ” de la ecuación respectiva a la FDP seleccionada.

*Coeficiente de Escorrentía*

Se define al coeficiente de escorrentía como la proporción del agua precipitada que escurre superficialmente. Y ello obedece a que no toda la lluvia que cae sobre una superficie genera escorrentía, ya que existen pérdidas por infiltración, evaporación y retención de la superficie, dependiendo del tipo de suelo o del material sobre el cual se recibe a la lluvia. Por ende, en un sistema de captación de aguas lluvias, será deseable que el coeficiente de escorrentía del área de captación sea lo más cercano

al valor 1, con el fin de propiciar la mayor tasa de escorrentía superficial para su almacenamiento.

*2.2 Dimensionamiento del SCALL*

Con la precipitación de diseño obtenida se calculan las dimensiones del área de captación y del estanque acumulador, para lo que se dan dos casos. En el primero, se define a priori un volumen de agua a almacenar, por ejemplo, si se cuenta con un hidroacumulador de cierto volumen, o si se tiene definida la demanda que se desea cubrir. Entonces habrá que calcular el área de captación necesario para dicho volumen. En el segundo caso, si se cuenta con una determinada área de captación, entonces se calculará el volumen de agua posible de acumular. En el presente estudio se definió un volumen a almacenar y se estimó el área de captación, usando la siguiente expresión:

$$A_{cap} = \frac{V_c}{P * C} \tag{21}$$

donde

- $A_{cap}$  Área de captación en la ladera ( $m^2$ )
- $V_c$  Volumen del hidroacumulador y/o volumen a capturar por año ( $m^3$ )
- $P$  Precipitación de diseño (m)
- $C$  Coeficiente de escorrentía del área de captación

### 3. RESULTADOS

Se muestran los resultados obtenidos de las experiencias desarrolladas en la Región del Maule (2018) y en la Región de Valparaíso (2015). A priori se buscaron y se seleccionaron los sitios donde se construirían las obras, de acuerdo a los objetivos planteados en cada proyecto.

#### 3.1 Obtención de la precipitación de diseño

##### Selección de estaciones pluviométricas

Para cada sitio se seleccionó una estación pluviométrica cercana y se obtuvo la serie de precipitación anual (Tabla 1). Se buscaron estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas, entidad perteneciente al Ministerio de Obras Públicas de Chile, o a la Dirección Meteorológica de Chile, perteneciente a la Dirección General de Aeronáutica Civil, ya que ambas instituciones poseen estaciones de larga data y cumplen con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Tabla 1. Sitios donde se construyeron los SCALL y las estaciones pluviométricas para cada sitio

Región	Sitio	Estaciones pluviométricas	Ubicación estación		Período	Registro total (años)
			Lat.S	Long.W		
Valparaíso	Las Palmas y Santa Julia, Petorca	Palquico	32°15'10''	71°08'19''	1973-2014	41
Valparaíso	Santa María de Pullally, Papudo	Longotoma	32°33'32''	71°22'30''	1980-2014	34
Valparaíso	El Leoncito, Puchuncaví	Laguna de Zapallar	32°35'31''	71°25'56''	1988-2014	26
Valparaíso	Reserva Lago Peñuelas	Lago Peñuelas	33°08'42''	71°33'19''	1974-2014	40
Maule	R.Muñoces, S.Clemente	Durazno	35° 29' 11"	71° 17' 35"	1970-2015	45
Maule	Las Lomas, S. Clemente	Durazno	35° 29' 11"	71° 17' 35"	1970-2015	45
Maule	Ranchillo, San Javier	Nirivilo	35° 32' 20"	72° 05' 29"	1962-2015	54
Maule	El Trigal, San Javier	Nirivilo	35° 32' 20"	72° 05' 29"	1962-2015	54
Maule	Macal, Constitución	Gualleco	35° 14' 38"	71° 58' 48"	1962-2015	54
Maule	Pantaniillo, Curepto	Gualleco	35° 14' 38"	71° 58' 48"	1962-2015	54

#### Ajuste a una función de distribución de probabilidad

Una vez definida la estación, los datos de precipitación anual se ajustaron a funciones de distribución de probabilidad. Aunque la función de Gumbel es la que ha dado mejores resultados para registros hidrológicos, se probaron otras FDP, como la de Goodrich, log Normal y Pearson III. A modo de ejemplo, se muestran estos ajustes para la estación Lago Peñuelas de la Región de Valparaíso, perteneciente a la DGA (Tabla 2). Para el cálculo de la precipitación de diseño, se propone trabajar con una probabilidad de excedencia de 0.9 o con una probabilidad ocurrencia de 0.1. Es decir, se espera que en al menos 9 años de 10, la precipitación anual sea mayor a la de diseño, y se capture un volumen de agua mayor o igual que el volumen definido en el diseño. Esto se basa en que esta probabilidad es considerada rentable desde un punto de vista económico, ya que probabilidades superiores, por ejemplo, si se considera que en 99 de cada 100 años se obtendrá la precipitación de diseño, se establecerá

una estructura de grandes dimensiones con un alto costo de oportunidad, determinando una subutilización muy alta de la infraestructura construida. Por ello, se estima que un 90% es una probabilidad de éxito recomendable (Fernández et al, 2017; Unesco, 2015). Como se observa en la tabla anterior, una diferencia entre las FDP es el número de parámetros que deben ajustarse, lo cual incide en la complejidad de su uso. Para esta estación las funciones de Gumbel y Log-Normal arrojan una precipitación de diseño similar ( $x_i = 344$  y  $346$  mm, respectivamente). Al realizar las pruebas de bondad de ajuste (Tabla 3) se observa que todos los ajustes se aceptan para la prueba de K-S, y que los valores del coeficiente de determinación son similares y altos. Es decir, las cuatro FDP son válidas, no obstante, como ya se mencionó la función del Gumbel es la que se recomienda para registros hidrológicos. En la Tabla 4 se presenta la función de Gumbel ajustada y sus respectivas validaciones para las estaciones consideradas.

Tabla 2. Parámetros ajustados a las cuatro FDP para precipitación anual de la estación Lago Peñuelas, Región de Valparaíso, Chile.

Gumbel		Goodrich		Log-normal		Pearson III	
<b>Promedio</b>	687.11	<b>Promedio</b>	687.11	<b>Promedio</b>	687.11	<b>Promedio</b>	687.11
<b>Desviación</b>	311.56	<b>Des. Est.</b>	311.56	<b>Des. Est</b>	311.56	<b>Des. Est</b>	311.56
<b>U</b>	546.89	<b>N</b>	41	<b>A</b>	6.4250	<b>Γ</b>	0.58
<b>D</b>	0.004	<b>s<sup>3</sup></b>	30,241,934.61	<b>B</b>	0.4831	<b>B</b>	11.89
<b>N</b>	41	<b>m<sub>3</sub></b>	17,541,398.51	<b>F(x)</b>	0.1	<b>α</b>	90.36
<b>F(x)</b>	0.1	<b>P(p)</b>	0.580	<b>Xi</b>	345.60	<b>δ</b>	-387.16
<b>Xi</b>	344.29	<b>P (interp)</b>	0.481			<b>F(x)</b>	0.1
		<b>p+1</b>	1.481			<b>Xi</b>	283.74
		<b>s<sup>2</sup></b>	97,067.32				
		<b>Y (2p+1)</b>	0.996				
		<b>Y (p+1)</b>	0.886				
		<b>A</b>	1.22E-06				
		<b>X1</b>	86.1759				
		<b>F(x)</b>	0.1				
		<b>Xi</b>	315.99				

Tabla 3. Resumen de las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y R2 para las cuatro funciones ajustadas a la serie precipitación anual de la estación Lago Peñuelas

FDP Ajustada	Dc	Dt	Ajuste K-S	R <sup>2</sup>	Pp de diseño (mm)
Gumbel	0.0722	0.2076	Acepta Ho	0.9885	344.29
Goodrich	0.0776	0.2076	Acepta Ho	0.9854	315.99
Log- normal	0.0526	0.2076	Acepta Ho	0.9939	345.60
Pearson III	0.0756	0.2076	Acepta Ho	0.9840	283.74

Tabla 4. Ajustes de las series de precipitación anual a la Función de Gumbel y sus pruebas de bondad de ajuste.

Estaciones	Función de Gumbel ajustada (F(x))	R <sup>2</sup>	K - S (acepta Ho)*	
			Dt	Dc
Palquico	$e^{-e^{-0.009*(x-202.19)}}$	0.981	0.2224	0.092
Longotoma	$e^{-e^{-0.008*(x-208.34)}}$	0.967	0.284	0.094
Laguna de Zapallar	$e^{-e^{-0.008*(x-183.32)}}$	0.986	0.209	0.081
Lago Peñuelas	$e^{-e^{-0.004*(x-546.89)}}$	0.993	0.207	0.072
Gualleco	$e^{-e^{-0.004*(x-649,20)}}$	0.995	0.185	0.069
El Durazno	$e^{-e^{-0.005*(x-735,24)}}$	0.970	0.260	0.101
Huapi	$e^{-e^{-0.004*(x-826,54)}}$	0.991	0.197	0.061
Nirivilo	$e^{-e^{-0.004*(x-656,13)}}$	0.988	0.185	0.084

(\*): se acepta Ho si Dt > Dc

### 3.2 Coeficiente de escorrentía

Como ya se mencionó, el coeficiente de escorrentía depende de la superficie sobre la cual se produce el escurrimiento. Para el caso del uso de geomembrana como cubierta impermeabilizante se utilizó un coeficiente de 0.85 el que fue estimado por Unesco (2015).

### 3.3 Dimensiones de los SCALL construidos

Se establecieron las dimensiones de los SCALL en base a la precipitación de diseño ajustada y validada para cada lugar. Para el área de captura se utilizó geomembrana, por lo que el coeficiente de escorrentía tiene un valor de 0.85 y para almacenar el agua se implementaron estanques flexibles de dos tamaños: de 30 y 80 m<sup>3</sup> (Tabla 5).

Tabla 5. Dimensiones de los sistemas de aguas lluvias implementados

	Pp diseño (mm)	Volumen a almacenar (m <sup>3</sup> )	Área de captura (m <sup>2</sup> )
Las Palmas, Petorca	86.6	30	407
Santa Julia, Petorca	86.6	30	407
Santa María de Pullalli, Papudo	103.7	30	340
El Leoncito, Puchuncaví	110.6	30	320
Reserva Peñuelas, Valparaíso	344.3	30	103
R.Muñoces, S.Clemente	558	80	211
Las Lomas, S. Clemente	558	80	211
Ranchillo, San Javier	461	80	255
El Trigal, San Javier	461	80	255
Macal, Constitución	459	80	256
Pantanillo, Curepto	459	80	256

### 3.4 Área de captación

En este paso es importante la limpieza y nivelado del área para la instalación de una superficie impermeable. Cabe destacar que la pendiente mínima del área de captura se recomienda entre 5-10% para asegurar el escurrimiento de la lluvia captada. En un principio, para esta superficie se probaron 2 opciones: geomembrana y radier de hormigón.

#### Área de captación con geomembrana

En el caso de la geomembrana se utilizó geomembrana negra lisa de HDPE de 1 mm de espesor y cuyo fusionado se realizó con máquina soldadora de cuña caliente (a una temperatura de 420°C). Un aspecto a considerar es el anclaje de la geomembrana en el suelo, con el fin de evitar que esta sea removida y desplazada por el viento, para lo cual se utilizaron 2 sistemas:

- i. Entierro de la geomembrana en una zanja con camellón: se hace una zanja con camellón por todo el perímetro del área de captación,

de 30 cm de profundidad, con el propósito de que el borde de la geomembrana cubra el camellón y se entierre en la zanja, para posteriormente tapar con material de la excavación.

- ii. Estructura de soporte de geomembrana: consiste en un armazón de polines de madera que se construye en el perímetro del área de captación, que es la que sostendrá a la geomembrana. Este método toma más tiempo que el primero y requiere tener cuidado de evitar el roce de la geomembrana con el armazón para que no se desgaste ni se dañe.

La elección del sistema de anclaje está ligada a las características del terreno y materiales disponibles, aunque el primero requiere menos tiempo si se cuenta con maquinaria.

#### Área de captación de hormigón

Consiste en un radier que se adecúa a la pendiente, con un espesor mínimo de 8 a 10 cm con una malla

ACMA C-139 en la parte inferior. El hormigón utilizado fue un H-20 y se recomienda un premezclado para garantizar la calidad del mismo. Se recomienda hacer una terminación con una máquina alisadora de hormigón, para que el coeficiente de

escorrentía sea lo más alto posible. Este captador lleva un borde en todo su perímetro de 30 cm de altura y está construido también en hormigón (Figura 3).



Figura 2. Anclaje de la geomembrana: enterrada en una zanja perimetral (izquierda) y armazón de polines (derecha)



Figura 3. Áreas de captación utilizadas (izquierda: Geomembrana; derecha: Hormigón)

### Comparación de geomembrana y hormigón

Como se mencionó anteriormente, en las primeras experiencias (2012) se implementaron SCALL utilizando como área de captación, geomembrana y cubierta de hormigón (Unesco, 2015). Se evaluó el coeficiente de escorrentía de ambos materiales, con el fin de determinar cuál de los dos es más eficiente en generar escorrentía superficial dado un monto de lluvia. Se encontró que la geomembrana presenta un coeficiente mayor, con valores que fluctúan entre 0.85 a 0.9 mientras que el hormigón generó valores cercanos al 0.7. Es decir, dado un monto de lluvia, la

geomembrana genera un mayor volumen de escorrentía superficial lo que se traduce en un mayor volumen de agua a almacenar.

### 3.5 Estanque de acumulación

En un principio se utilizaron varios tipos de estanques de acumulación, a saber, estanque vertical de fibra de vidrio (20 m<sup>3</sup>), estanque vertical de polietileno (30 m<sup>3</sup>), estanque tipo australiano (40 m<sup>3</sup>), estanques flexibles de PVC (20, 30 y 50 m<sup>3</sup>) y excavaciones impermeabilizadas con geomembrana (50 y 60 m<sup>3</sup>) y hormigón (30 m<sup>3</sup>), ambas techadas

(Pizarro et al., 2016). De ellos, el estanque flexible es el más recomendable ya que posee varias ventajas respecto a los demás. Entre ellas, su fácil traslado ya que al estar vacío se puede doblar como una bolsa; es totalmente cerrado, impidiendo la entrada de luz y oxígeno que puedan alterar la calidad del agua; su

volumen se expande de acuerdo a la cantidad de agua acumulada, y tiene la mejor relación costo/beneficio. Por ello, en los SCALL construidos con posterioridad se utilizaron hidroacumuladores de estanque flexibles de 30 y 80 m<sup>3</sup>, no obstante, en el mercado existe una variedad de volúmenes de acuerdo a las necesidades.

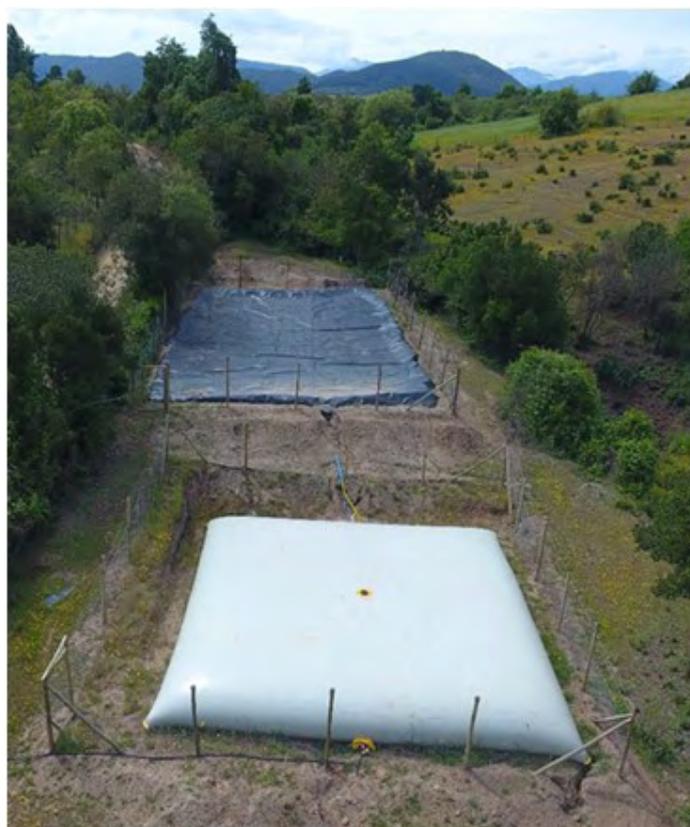


Figura 4. Sistema de Captación de Aguas Lluvias instalado en la Región del Maule (sector Rincón de los Muñoces, Región del Maule), con área de captación de geomembrana y estanque flexible de 80 m<sup>3</sup>

### *3.6 Otros análisis*

#### *Calidad de agua*

Del agua lluvia almacenada en los distintos hidroacumuladores se extrajeron muestras para someterlas a análisis físico-químico del agua con el fin de verificar su calidad para los distintos usos. El análisis se basó en las normas chilenas NCH 409, para agua potable y la norma NCH 1.333 para riego. Se encontró que el agua almacenada era de buena calidad, tanto para la norma de agua potable como para la de riego. Incluso después de 6 meses de tomadas las muestras, el agua mostró tener una muy buena calidad (Pizarro et al, 2016). Cabe destacar que análisis se realizó en los SCALL con el área de captura cubierta con geomembrana y hormigón; no se

han realizado estas pruebas para el agua capturada en techo.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A partir del desarrollo e implementación de los SCALL se pudieron establecer algunos criterios para su construcción. Un primer elemento es determinar los parámetros hidrológicos del diseño, los que dependen de la precipitación y del material impermeabilizante del área de captura. La precipitación es muy relevante por la alta variabilidad que esta tiene en todo el territorio nacional y es el principal factor para determinar las dimensiones de las obras y los volúmenes a almacenar. En este sentido, se recomienda el uso de la Función de

Distribución de Probabilidad de Gumbel y una probabilidad de excedencia del 0.9 para obtener la precipitación de diseño. Con ello, se espera que 9 de cada 10 años se capture como mínimo, el volumen diseñado y se generen excedentes de agua. Por otra parte, el material definido para el área de captura de la lluvia incide en el coeficiente de escurrimiento, es decir, en el volumen de agua que escurre a partir de la precipitación. Por ello, se debe buscar materiales con un mayor coeficiente, siendo recomendable el uso de geomembrana, ya que presenta un coeficiente de escurrimiento de 0.85. En relación al hidroacumulador se recomienda un estanque

hermético que impida el contacto del agua con la luz y oxígeno, para evitar la propagación de microorganismos que afecten la calidad del agua almacenada. Finalmente, para la construcción y diseño de los SCALL en zonas rurales se recomienda el uso de estanques flexibles para acumular el agua, mientras que para impermeabilizar el área de captura se recomienda el uso de geomembrana. Esto tomando en cuenta la facilidad en su instalación, mantiene la calidad del agua y presenta la mejor relación costo/beneficio en términos hidrológicos y económicos.

## REFERENCIAS

- Fernández, P., Bonomelli, C., Guevara, C., Menéndez-Miguélez, M., Celis, V., Barrera, C., Preller, C., Pizarro, R., Sangüesa, C., Doll, U., Campos, D., Berríos, Á., Vallejos, C., Mendoza, R., Pino, J. (2017). Sistema de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) y su aplicación en el establecimiento de maqui. Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca y Pontificia Universidad Católica de Chile. ISBN 978-956-329-075-2.
- García-Chevesich, P., Valdes-Pineda, R., Neary, D., Pizarro, R. (2015). Using rainwater harvesting techniques for firefighting in forest plantations. *Journal of Tropical Forest Science*. 27(1): 1–2.
- Pizarro, P., Ingram, B., Gonzalez-Leiva, G., Valdés-Pineda, R., Sangüesa, C., Delgado, N., García-Chevesich, P., Valdés, J.B. (2018). WEBSEIDF: A Web-Based System for the Estimation of IDF Curves in Central Chile. *Hydrology*, 5, 40; doi:10.3390/hydrology5030040
- Pizarro, R., Urbina, F., Vallejos, C., Mendoza, R., Guzmán, J., Tapia, J., Sangüesa, C., Campos, D., Pino, J., Saenz, R., Tigero, T., García, P., Ibarra, J., Abarza, A., Garrido, R., Ruiz, R., Morales, Carolina., Avendaño, C. (2016). Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL): una experiencia de 3 años Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, Universidad de Talca. Chile. ISBN 978-956-329-070-7.
- Pizarro, R.; Ausensi, P.; Aravena, D.; Sangüesa, C.; León, L.; Balocchi, F. (2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Revista Aqua Lac, Programa Hidrológico Internacional*. Vol. 1. N° 2. Pp. 172 – 185
- Pizarro, R., Novoa, P. (1986). Elementos técnicos de Hidrología I. Instructivos técnicos. La Serena, Chile. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. 57 p.
- Sangüesa, C., Pizarro, R., Ibañez, A., Pino, J., Rivera, D., García-Chevesich, P., Ingram, B. Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI. (2018). *Water*, 10(2), 112; doi:10.3390/w10020112
- UNESCO. (2015). Manual de diseño y construcción de sistemas de capacitación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile Documento Técnico N° 36. ISBN 978-92-9089-198-7.
- Valdes-Pineda, R., García-Chevesich, P., Valdés, J.B., Pizarro-Tapia, R. (2020). The First Drying Lake in Chile: Causes and Recovery Options. *Water* 2020, 12, 290; doi:10.3390/w12010290



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



## Presión hídrica en una cuenca del trópico húmedo y propuestas para su mitigación

*Water pressure in a basin of the humid tropics and proposals for its mitigation*



Anne M. Hansen\*, Abel A. Ruiz Castro

Recibido: 29/09/2021

Aceptado: 06/10/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Actualmente están comprometidos gran parte de los recursos hídricos en el mundo, tanto en cantidad como calidad. Debido a la acumulación de nutrientes, presentan eutroficación o hipereutroficación más de 70 % de los cuerpos de agua monitoreados en México. Ejemplo de esto son los cuerpos de agua en la cuenca del río Atoyac en el estado de Guerrero que, a pesar de localizarse en una región del trópico húmedo, se observa presión hídrica y serio deterioro ambiental. El objetivo de este trabajo es caracterizar las causas de esta presión hídrica y con base en ellas, formular propuestas para su mitigación. A partir de información georreferenciada sobre población, hidrológica y de usos de suelo, así como caudales de agua descargada y concentraciones contaminantes, se desarrolló el inventario de emisiones de sólidos, nutrientes y demanda de oxígeno por fuentes puntuales y difusas. Asimismo, basado en los números de cabezas y cargas contaminantes por tipo de ganado, se determinaron las emisiones por actividad pecuaria. Se evaluó también la extracción de agua para el distrito de riego (DR 095) y cómo influye en el caudal del río. Los resultados indican que las fuentes difusas representan más de 90% de las emisiones contaminantes y la actividad pecuaria es la fuente con mayor emisión, y que la extracción del agua para el DR 095 impacta negativamente el caudal del río. Basado en esta información, se proponen medidas para mitigar la presión hídrica en la cuenca, mismas que deben ser consensuadas entre actores civiles e institucionales.

**Palabras clave:** Emisiones contaminantes, fuentes puntuales y difusas, caudal del río, actores sociales e institucionales, normatividad, soluciones consensuadas

### Abstract

*Currently, a large part of the world's water resources are compromised, both in quantity and quality. Due to the accumulation of nutrients, more than 70% of the monitored water bodies in Mexico present eutrophication or hypereutrophication. An example of this are the water bodies in the Atoyac river basin, in the state of Guerrero that, despite being located in a region of the humid tropics, both water pressure and serious environmental deterioration are observed. The objective of this work is to evaluate the causes of this water pressure, and to formulate proposals for their mitigation. Based on georeferenced information on population, land uses and hydrology, as well as discharged water flow rates and pollutant concentrations, emissions inventories for nutrients, oxygen demand and suspended solids from point and diffuse sources were developed. Likewise, based on the number and polluting loads by type of animal, the emissions from livestock production were also determined. The extraction of water for the irrigation district (DR 095) and how it affects the river flow was also evaluated. The results indicate that diffuse source emissions account for more than 90 % of the polluting emissions, representing livestock activities the source with the highest generation, and that water extraction for the DR 095 exerts a negative impact on the river flow. Based on this information, measures are proposed to mitigate the water pressure in the basin, which must be agreed upon amongst civil and institutional actors.*

**Keywords:** Pollutant emissions point and diffuse sources, river flow, social and institutional actors, regulations, consensual solutions

---

1 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, 62550 Mor., México. Teléfono: +52 (777) 329 3600 ext. 610 y 161. ahansen@tlaloc.imta.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua promedio anual en el Mundo, es de aproximadamente 1,386 millones km<sup>3</sup> y sólo 2.5 % equivale a agua dulce. Se estima que menos de 1 % del agua dulce se encuentra disponible para los ecosistemas y para consumo humano (FCEA 2017). Sigue en aumento el consumo de agua para la creciente población en el Mundo igual que la demanda de agua para el desarrollo de las actividades económicas. A nivel mundial, el consumo de agua es de 3,750 km<sup>3</sup>/año y se distribuye como sigue: actividad agrícola y pecuaria (69 %), industria (19 %) y abastecimiento a población (12 %) (UNESCO 2021), y las descargas de estos usos impactan tanto en la disponibilidad del agua y su calidad, poniendo bajo presión a los recursos hídricos y los ecosistemas. Se habla de presión hídrica cuando la demanda de agua excede la disponibilidad o cuando el uso se ve restringido por la baja calidad (Zarza 2021). En varias partes de México se presenta presión hídrica. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, en 7 de las 13 regiones hidrológicas administrativas del país, se ejerce un alto o muy alto grado de presión sobre el agua (CONAGUA 2021a). Asimismo, el análisis de información publicada por la Red

Nacional de Monitoreo del Agua (CONAGUA 2021b) muestra, que al menos 70 % de los cuerpos de agua monitoreados, presenta eutroficación o hipereutroficación, debido a la acumulación de nutrientes provenientes de cargas contaminantes (Hansen et al. 2020). Estas cargas resultan de emisiones desde fuentes tanto puntuales y como difusas. La zona del presente estudio es la cuenca del río Atoyac (Figura 1), que se encuentra en una zona llamada La Costa Grande en el estado de Guerrero y que combina vertientes montañosas y zonas costeras.

Esta cuenca se extiende en una superficie de 900 km<sup>2</sup> y su colector principal es el río Atoyac, que tiene 68 km de longitud y desemboca en la costa del Océano Pacífico. La parte alta de la cuenca tiene más de 3,500 msnm, con clima sub-cálido y precipitación medio de 2,500 mm/año, mientras que la parte baja tiene clima cálido húmedo, con precipitación medio de 1,200 mm/año (INEGI 2015a). El río Atoyac presenta un caudal medio para época de lluvia de 57 m<sup>3</sup>/s, y para estiaje, de 9.0 m<sup>3</sup>/s (CONAGUA 2014). En el 2015, la población total en la cuenca era de 53,040 habitantes con una proporción 67 % urbano y 33 % rural (INEGI, 2015b).

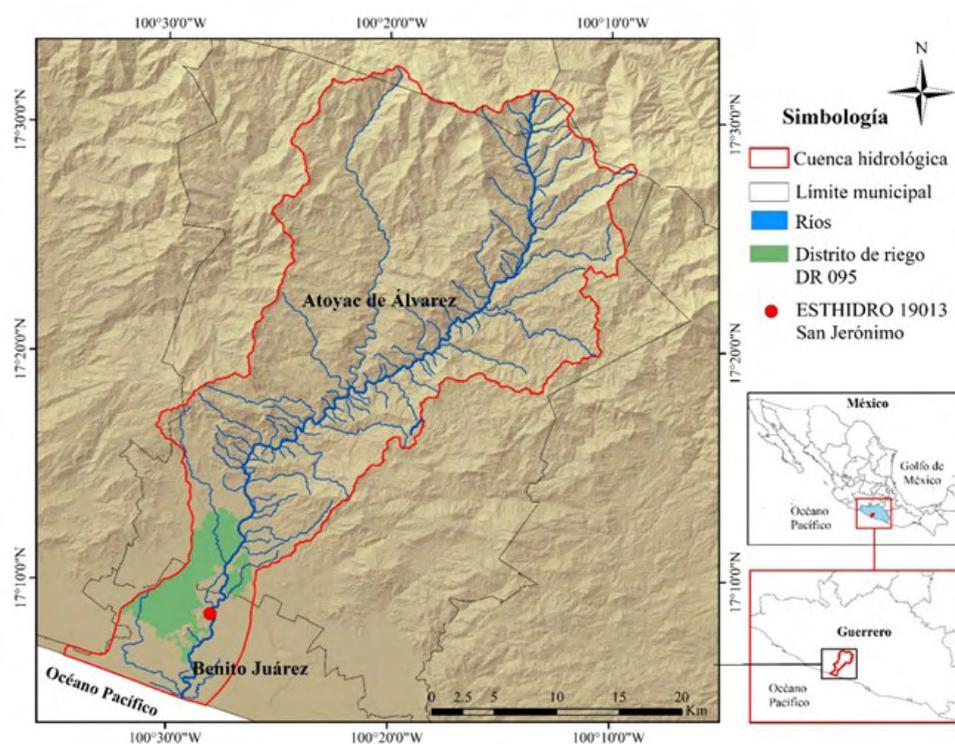


Figura 1 Ubicación de la cuenca hidrológica del río Atoyac, Gro. Elaborado con información de INEGI (2010) y CONAGUA (2014)

Los usos de suelo se distribuyen de la siguiente manera: 70 % bosque y selva, 13 % agricultura, 13 % pastizal y 4 % zona urbana y otros usos como cuerpos de agua (INEGI, 2012; PDM, 2015). La agricultura comprende principalmente cultivos de maíz, café, mango y coco (SAGARPA, 2016a) y el distrito de riego DR 095 es uno de los principales usuarios del agua en el río Atoyac. Los pastizales se distribuyen en toda la cuenca, y es donde se desarrollan las actividades pecuarias de ganado bovino.

Estudios previos revelan que el agua del río Atoyac es de mala calidad, presentando concentraciones elevadas de sólidos en suspensión, contaminación fecal, nutrientes y de carga orgánica, que genera elevada demanda de oxígeno (CNDH 2019). Las causas de la mala calidad del agua han sido identificadas como: (1) la sustitución de selva y bosque por usos de suelo agrícola y pecuario, (2) extracción de agua, principalmente para riego agrícola, (3) descargas de agua residual sin tratamiento alguno de localidades rurales y urbanas, así como (4) el manejo inadecuado de residuos sólidos (Jiménez Varela et al. 2000; Fierro Leyva y Alcántara Valverde 2008). Hace dos décadas se elaboró un diagnóstico del estado de los recursos naturales y se propusieron alternativas para el buen uso, manejo y conservación de estos recursos. En este diagnóstico se identificaron las fuentes de contaminación que afectaban la calidad del agua del río Atoyac y la pérdida de recursos naturales debido al desarrollo de actividades económicas locales (Jiménez Varela et al. 2000). Sin embargo, este diagnóstico no contempló la historia socio-natural de la región, ni incorporó estrategias de comunicación social y de fortalecimiento de capacidades. Posteriormente, en el año 2005 fue seleccionada la cuenca del río Atoyac como cuenca piloto para impulsar el Programa Pro-Regiones, de la Universidad Nacional Autónoma de México, buscándose el fomento de la mejora ambiental y consecuente beneficio de la región. Este Programa estuvo enfocado a generar un diagnóstico y plan de acción para mejorar el sistema de manejo de residuos sólidos municipales a corto y mediano plazos, y a promover la educación ambiental con la participación de estudiantes de nivel educativo secundaria y preparatoria (Fierro Leyva y Alcántara Valverde, 2008). Aunque se planteó instrumentar las acciones definidas en el Programa en un plazo de diez años, los resultados fueron poco alentadores; no obstante

quedó sembrada la semilla entre los habitantes de la cuenca (Fernández Gómez y Fierro Leyva 2015).

Derivado de lo anterior y de una queja ciudadana interpuesta por representantes de la sociedad civil ante la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH), por el serio deterioro ambiental del río Atoyac, la CNDH conviene con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) el apoyo en la evaluación de la problemática y propuesta de soluciones para la mejora ambiental y el saneamiento de este río (CNDH 2019).

Posteriormente, la CNDH emite la recomendación CNDH 56/2019 sobre el caso de las violaciones a los derechos humanos a un medio ambiente sano y al saneamiento del agua, por la contaminación del río Atoyac por descargas de aguas residuales municipales no controladas, y por la inadecuada gestión de los residuos sólidos urbanos, en los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez, estado de Guerrero, que solicita a las autoridades correspondientes y municipios destinatarios, analizar las propuestas desarrolladas por el IMTA para dar solución a la problemática descrita, así como buscar acercamiento para obtener asesoría para el desarrollo e implementación de acciones reparatorias de los daños ambientales (CNDH 2019). A continuación, el IMTA desarrolló un estudio en colaboración en conjunto con la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGRO) y la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), que forma parte del Programa Nacional Estratégico en materia de agua (PRONACES Agua) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). En este estudio se mapearon los actores estratégicos en la cuenca, se realizaron seminarios y talleres con estos actores para vinculación y propuesta de estrategias. Para estas estrategias se contempla la confluencia de conocimiento técnico y saberes locales para compatibilizar los métodos epistémicos así como para identificar posibles obstáculos y las acciones necesarias para transformar estos en elementos de oportunidad y aprendizaje. Se conformó un grupo de trabajo interdisciplinario e interinstitucional y con la participación de actores sociales e institucionales. Como resultado de este estudio, se elaboró una propuesta para desarrollar un modelo de ordenamiento territorial de la cuenca del río Atoyac, Gro., basado en la gestión participativa con corresponsabilidad público-social y fortalecimiento de capacidades para la sostenibilidad ambiental y el

ejercicio de los derechos humanos. Esta propuesta, que se plantea desarrollar durante tres años, se sometió al programa PRONACES Agua del Fondo Institucional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) del CONACYT, y se encuentra actualmente en proceso de evaluación. En el presente trabajo se determinan las causas de la presión hídrica en el río Atoyac, Gro., y se formulan las propuestas para su mitigación, mismas que deben ser consensuadas entre los actores civiles e institucionales.

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el desarrollo de inventarios de emisiones contaminantes por fuentes puntuales y difusas, que integran información georreferenciada sobre hidrología, población, usos de suelo y actividad pecuaria, así como de los volúmenes de agua descargada y respectivas concentraciones de contaminantes. Se analizaron los caudales del río y la extracción de agua al DR 095 para determinar la presión que ejercida. Finalmente, se menciona brevemente las acciones de mapeo de actores involucrados en la propuesta de mitigación de la presión hídrica en la cuenca.

### Desarrollo de inventario de emisiones contaminantes

Se determinaron las emisiones contaminantes de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Sólidos Suspendedos Totales (SST) y los nutrientes nitrógeno y fósforo total (NT y PT) de las fuentes puntuales y difusas (Figura 2). Con excepción de las emisiones por actividad pecuaria, se calcularon las emisiones contaminantes, mediante los caudales descargados y las concentraciones contaminantes asociadas. Para la ubicación de las fuentes de emisión puntual se utilizó información georreferenciada sobre municipios, localidades urbanas y rurales y población total (INEGI 2010) y se procesó en un ArcView v.3.0. El caudal de agua residual colectado corresponde al agua residual generada por localidad urbana (población mayor a 2,500 habitantes) (Figura 3). Se determinó este caudal a partir del número de habitantes por localidad urbana, porcentaje de cobertura de agua potable y alcantarillado para los municipios donde pertenecen (INEGI 2015b), dotación media de agua por habitante en el estado (CONAGUA 2012), y considerando que entre 70 y 75% del agua dotada se desecha como agua residual mientras que el restante se consume (CONAGUA 2007).

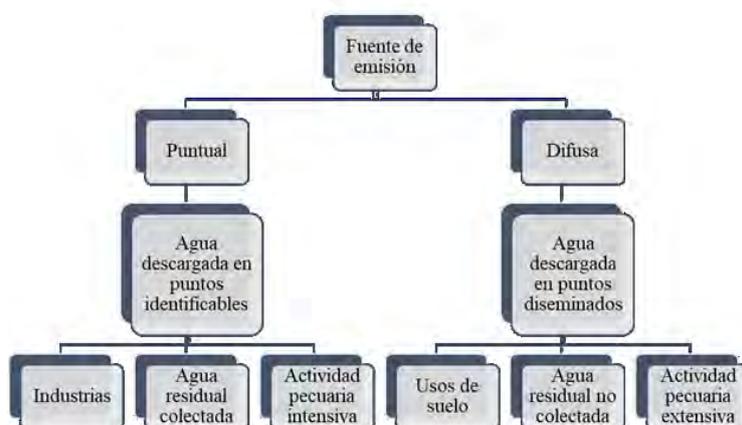


Figura 2 Clasificación de fuentes contaminantes

Las concentraciones promedio de parámetros en agua residual doméstica, son de 200 mg/l para DBO5 y SST, 40 mg/l para NT y 10 mg/l para PT (Metcalf y Eddy 2004). Acerca de las emisiones por fuentes industriales, no se encontró registro alguno para esta cuenca (CONAGUA 2020). Asimismo, no se identificaron emisiones por actividad pecuaria intensiva. Finalmente, en el inventario nacional de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR)

(CONAGUA 2015), se reporta una PTAR, misma que no se consideró en este inventario ya que se encontraba fuera de operación. Para ubicación de las fuentes de emisión difusa, se utilizó información georreferenciada sobre usos de suelo y vegetación (INEGI 2012) (Figura 4), misma que se procesó con ArcView v. 3.0 para determinar las áreas de cobertura.

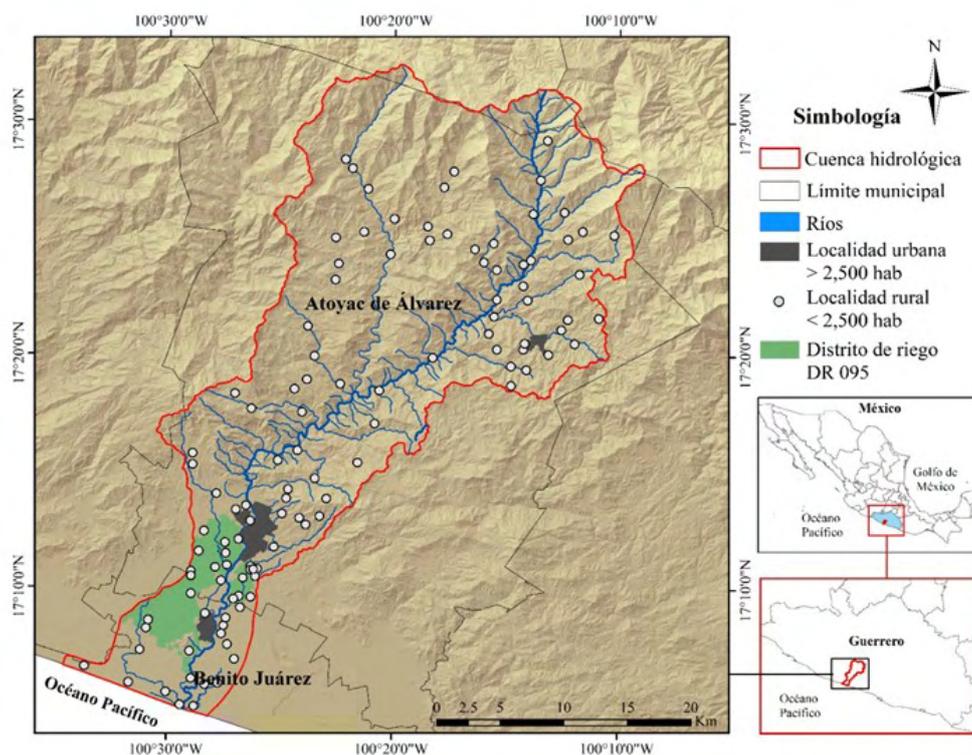


Figura 3 Localidades urbanas (>2,500 hab) y rurales (<2,500 hab) en la cuenca del río Atoyac Gro. Elaborado con información de INEGI (2015b)

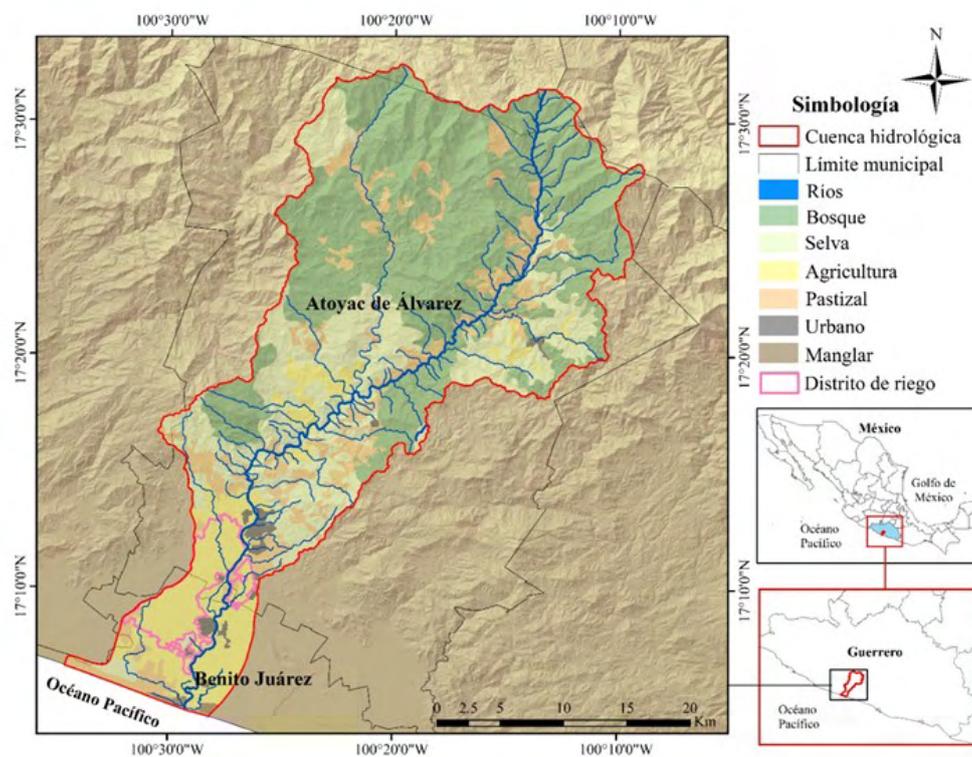


Figura 4 Distribución de usos de suelo y vegetación en la cuenca del río Atoyac, Gro. Elaborado con información de INEGI (2012)

Se obtuvieron las descargas por escurrimiento de los usos de suelo mediante información sobre estas áreas, precipitación medio anual y coeficiente medio de escurrimiento (INEGI 2015a). En este respecto, se presentan valores de precipitación de 2,500 mm/año en la parte alta (>3,500 msnm), 1,500 en la parte intermedia (350-3,500 msnm) y 1,200 mm/año en la zona baja próxima a la costa. Asimismo, los coeficientes de escurrimiento varían entre 0.1 y 0.2 (INEGI 2015a), y para este trabajo se consideró el valor promedio de 0.15. Las concentraciones contaminantes asociadas a descargas en escurrimiento por tipo de suelo se presentan en la Tabla 1.

Para la determinación de las emisiones por agua residual sin colector, se determinó el caudal de agua residual total no colectado, sumando los caudales de agua residual no colectados en localidades urbanas y rurales. El caudal de agua residual urbano (>2,500 hab) no colectado se obtuvo mediante diferencia del caudal total urbano generado y el caudal colectado. Para las localidades rurales (<2,500 hab) que no cuentan con sistema de drenaje y alcantarillado, se estimó el caudal de agua residual rural no colectado con la información georreferenciada sobre estas localidades y su población, la dotación de agua por habitante en función del clima (CONAGUA s/f) y considerando que entre 70 y 75% del agua dotada se desecha como agua residual y el restante se consume (CONAGUA, 2007). Para obtener las emisiones de esta fuente, se multiplicaron los caudales obtenidos

con las concentraciones promedio reportadas en la literatura para agua residual doméstica de 200 mg/l para DBO5 y SST, 40 mg/l para NT y 10 mg/l para PT (Metcalf y Eddy 2004).

Para esta cuenca no se dispone de información sobre actividad pecuaria intensiva como ubicación de granjas, tipo de instalaciones, así como el manejo, tratamiento y disposición de los desechos generados, repercute en las emisiones y la potencial contaminación de cuerpos de agua. Para determinar las emisiones por actividad pecuaria extensiva, se determinó el número total de cabezas por tipo de ganado a partir de la información oficial agropecuaria (INEGI 2007), y proyectada al año 2016 mediante las tasas de crecimiento de la población ganadera a nivel estatal, de acuerdo con la información publicada por SAGARPA (2016b, c y d). No se encontró información sobre la ubicación específica de las granjas donde se mantiene al hato ganadero; sin embargo, de acuerdo con el Anuario Geográfico y Estadístico de Guerrero, se menciona que se ubican en la cercanía de las cabeceras de ambos municipios con sistema extensivo de libre pastoreo (INEGI 2017). En la literatura, se encontraron reportadas cargas contaminantes para diferentes especies de ganado (Tabla 2). Para el ganado porcino se encontraron reportadas emisiones de NT, PT, DBO5 y SST por Unidad de Peso Agropecuario, que corresponde a un peso animal de 100 kg, alcanzado en un periodo aproximado de 23 semanas de vida.

Tabla 1 Concentraciones contaminantes en escurrimiento por diversos usos de suelo

Uso de suelo	NT	PT	DBO <sub>5</sub>	SST
	(mg/L)			
Agrícola	1.6	0.4	4.0	201.0
Bosque	0.8	0.1	6.0	39.0
Pastizal	1.5	0.1	6.0	70.0
Urbano	15	100	3.4	0.8

Elaborada con información de Benaman et al. (1996)

Tabla 2 Cargas contaminantes (g/cabeza día) de diversos tipos de ganado

Tipo de fuente	DBO <sub>5</sub>	SST	NT	PT	Referencia
Porcino <sup>a</sup>	250	600	50	13	Taiganides <i>et al.</i> (1996)
Bovino cárnico <sup>b</sup>	485	700	104	80	Jones y Sutton (2003)
Bovino lechero <sup>c</sup>	905	1000	217	88	

<sup>a</sup>Peso promedio de (43 kg); <sup>b</sup>Peso promedio de animal (304 kg); <sup>c</sup>Peso promedio de animal (350 kg)

Para este tipo de ganado, se consideró un peso medio de 43 kg, equivalente al peso promedio que tienen a las 13 semanas de vida (Dr. Pedro Juan Padral-Roa 2013, Comunicación personal). El ganado bovino se clasifica según su uso: lechero, cárnico o doble propósito. El peso de una res destinada a uso cárnico tiene un crecimiento desde aproximadamente 40 kg al momento de su nacimiento hasta 567 kg cuando es sacrificada, mientras que el crecimiento de una res lechera oscila entre 67 y 634 kg (Jones y Sutton, 2003).

#### *Extracción de agua para el sector agrícola y su efecto en el caudal del río*

Se obtuvo información de la Comisión Nacional del Agua sobre los caudales mensuales de agua extraída para el distrito de riego DR 095, en el periodo 2010 al 2018 (Ing. José Humberto Gastelum Espinoza, 2018, comunicación personal). Dicha información se analizó estadísticamente, obteniéndose los caudales de extracción medio mensual. Asimismo, se obtuvo el registro de escurrimiento de la única estación hidrométrica activa con clave 19013 “San Jerónimo”, para el periodo de 1970 al 2014 (CONAGUA 2014). Dicha información se analizó estadísticamente, obteniéndose los caudales medios mensuales de escurrimiento. Se compararon los caudales de extracción con el escurrimiento medio mensual, para conocer cómo la extracción afecta al caudal del río. Con base en la identificación y priorización de las fuentes contaminantes que ponen en riesgo la calidad del agua en el río Atoyac, así como la valoración del impacto que ejerce el distrito de riego DR 095 como usuario del agua de este río, se formularon propuestas para la mitigación de la presión hídrica y deterioro ambiental.

#### *Mapeo de actores estratégicos para mitigación de la presión hídrica*

Se realizó un mapeo de actores, a fin de identificar a los diferentes representantes interesados en la problemática de la presión hídrica en la zona, así como los intereses de cada actor, establecer un canal abierto de comunicación y para conocer posibles puntos de conflicto que puedan escalarse con el desarrollo y para la implementación de acciones de mitigación de la presión hídrica. Posteriormente, con el objetivo de contar con un diagnóstico consensuado de la problemática de la cuenca y sus posibles soluciones, se llevó a cabo un seminario-taller con actores estratégicos pertenecientes a diversos sectores

a nivel local, donde se discutió y se recibió retroalimentación sobre el planteamiento de un proyecto de investigación-incidencia a desarrollarse durante tres años en el marco de Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) en materia de agua. Se desarrolló y se presentó también la propuesta metodológica para llevar a cabo talleres de intercambio de ideas, para enriquecer la aplicación de las metodologías propuestas, logrando involucrar al mayor número posible de actores sociales e institucionales que habitan y actúan en el espacio territorial de la cuenca.

### **3. RESULTADOS**

#### *Inventarios de emisiones contaminantes*

Las emisiones contaminantes por fuentes puntuales y difusas en la cuenca del río Atoyac, Gro. muestran, que las fuentes difusas, que incluyen agua residual no colectada y escurrimientos de diversos usos de suelo, contribuyen con 95 % de NT, 97 % de PT, 95 % de DBO5 y 98 % de SST (Tabla 3). Entre las fuentes difusas se identifica la actividad pecuaria como el principal emisor de estos contaminantes. Las emisiones por agua residual colectada y no colectada resultaron de igual magnitud y juntos representan porcentajes bajos de emisiones contaminantes. Respecto a los sólidos en suspensión, es mayor la emisión por actividad pecuaria, seguido por usos de suelo bosque y selva, agrícola y pastizal. Es indispensable realizar esta jerarquización de emisiones contaminantes en cuencas y considerarla al formular propuestas de mitigación de la presión en los recursos hídricos. En América Latina y el Caribe, es común atender sólo las emisiones contaminantes por fuentes puntuales y no considerar las emisiones provenientes de fuentes difusas. Sin embargo, la jerarquización de emisiones contaminantes para la cuenca hidrológica del río Atoyac, Gro. muestra claramente que también se deben atender las emisiones por fuentes difusas, o de lo contrario, no habrá mitigación de la presión hídrica en esta cuenca. Extracción de agua para riego y efecto sobre el caudal del río. Finalmente, se analizó también la extracción de agua para el DR 095 y los caudales de escurrimiento en el río Atoyac (Figura 5), observando que el agua extraída en los meses de marzo a mayo representa una importante parte del agua escurrida y que la extracción puede comprometer todo el caudal del río en años más secos.

Tabla 3 Inventario de emisiones contaminantes en la cuenca del río Atoyac

Fuente de emisión	Población <sup>1</sup> (Hab)	Caudal descargado (Mm <sup>3</sup> /año)	Ganado <sup>2</sup>		Área (km <sup>2</sup> )	Emisión contaminante (t/año)			
			Porcino	Bovino		NT	PT	DBO <sub>5</sub>	SST
			(Cabezas)						
<b>Puntual</b>									
Agua residual colectada	35,652	1.58	NA		NA	63	16	316	316
<b>Subtotal</b>						<b>63</b>	<b>16</b>	<b>316</b>	<b>316</b>
<b>Difusa</b>									
Agua residual no colectada	17,388	1.57	NA	NA	NA	63	16	316	316
Actividad pecuaria extensiva	NA	NA	12,672	19,252	NA	1,102	612	4,896	6,740
<i>Usos de suelo</i>									
Agrícola	NA	23.1	NA	NA	123.3	36	8	93	4,653
Bosque y selva	NA	141.9	NA	NA	639.3	120	10	733	5,600
Pastizal	NA	26.9	NA	NA	123.3	41	3	162	1,887
<b>Subtotal</b>						<b>1,362</b>	<b>649</b>	<b>6,200</b>	<b>19,196</b>
<b>Total</b>						<b>1,425</b>	<b>665</b>	<b>6,516</b>	<b>19,512</b>

1 INEGI (2015b)

2 INEGI (2007) proyectado al 2016 mediante tasas de crecimiento de población ganadera en el estado (SAGARPA 2016b, c y d).

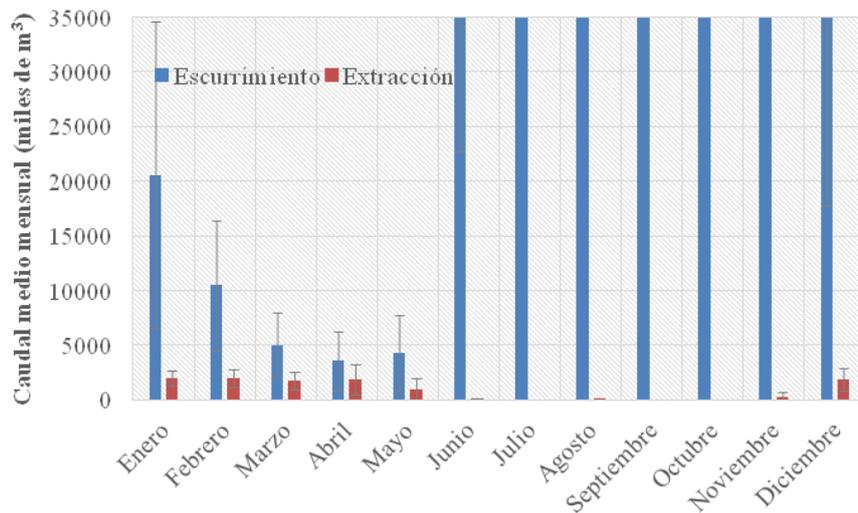


Figura 5 Caudales de extracción (2010-2018)<sup>1</sup> y de escurrimiento (1970-2014)<sup>2</sup> aguas abajo del DR 095, río Atoyac, Gro. En la gráfica no observan los escurrimientos de junio a diciembre, que varían entre mínimo 54,395 ± 31,658 en junio y máximo 238,877 ± 115,322 en septiembre

<sup>1</sup>Ing. José Humberto Gastelum Espinoza, 2018, comunicación personal). <sup>2</sup>CONAGUA (2014)

### Mapeo de actores estratégicos

Se identificaron 27 actores en la cuenca del río Atoyac, Gro; los cuales se agruparon en instituciones gubernamentales estatales y federales; autoridades municipales; instituciones educativas; organizaciones sociales; asociaciones religiosas y organismos de los sectores sociales y de economía. En los seminarios-taller se recibió retroalimentación de habitantes, líderes ambientales, actores sociales, así como autoridades locales y funcionarios, sobre el diagnóstico socio-ambiental de la cuenca y estos participantes expresaron los diversos problemas que ellos han percibido, tales como tala de bosques, contaminación de los cuerpos de agua y quema de basura. Mediante análisis de lo expresado en estos seminarios-taller, se confirmó que los principales problemas son presión hídrica y degradación ambiental, consecuencia de una falta de cultura ecológica y deficiente manejo de los recursos naturales. Se acordó que deben designarse y asumirse responsabilidades, para que diferentes instituciones puedan proporcionar constante supervisión, como por ejemplo brigadas contra incendios supervisadas por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Se construyó y consolidó un grupo transdisciplinario comprometido con la transformación social y ambiental en la región, integrado por estudiantes, organizaciones, dependencias, empresas, generando una construcción colectiva de los diagnósticos y dinámicas de incidencia de la problemática a resolver y se amplía el colectivo involucrando academias, dependencias gubernamentales, organizaciones de base comunitaria y empresas privadas, necesario para el proyecto propuesto sobre un modelo de ordenamiento territorial en cuencas, basado en sistemas de gestión participativa con corresponsabilidad público-social, la sostenibilidad

ambiental y el ejercicio de los derechos humanos, a aplicar en la cuenca del río Atoyac, Gro., como experiencia piloto.

### 4. DISCUSIÓN

A fin de formular propuestas para mitigación de la presión hídrica en la cuenca del río Atoyac, Gro., se determinó con detalle los usos de agua, su impacto en el caudal del río, y las emisiones contaminantes. Se desarrollaron los inventarios de emisiones por fuentes puntuales y difusas, mismos que permitieron jerarquizar las fuentes de emisión, y orientar los alcances de las propuestas de mitigación. Finalmente, se determinó la presión que ejerce el DR095 sobre el río, se analizó información sobre caudales y extracción de agua (Tabla 4). El control de las emisiones por ganadería puede lograrse mediante el control de número de cabezas en el territorio, la modificación de la dieta de ganado bovino y el reúso de excreta para fertilizante. De realizarse esto, se podría reducir las emisiones hasta en 77 % de N, 92 % de P, 75 % de DBO, y 35 % de SST. Para el control de las emisiones por agua residual colectada, se propone la instalación y rehabilitación de alcantarillado, así como cunetas pluviales y tratamiento de escurrimiento urbano, e instalación y rehabilitación de plantas de tratamiento de agua residual. La implementación de estas acciones reducirían las emisiones hasta en 4.4 % de N, 2.4 % de P, 4.8 % de DBO, y 1.6 % de SST. Asimismo, para el control de las emisiones por agua residual no colectada, se propone la instalación y rehabilitación de alcantarillado, así como la instalación de sistemas descentralizados de tratamiento, lográndose así una reducción en las emisiones hasta en 4.4 % de N, 2.4 % de P, 4.8 % de DBO<sub>5</sub>, y 1.6 % de SST. Las

emisiones por sedimentos pueden mitigarse controlando las cabezas de pastoreo, la tala inmoderada de madera y reforestando zonas degradadas. Esto, lograría una reducción en las emisiones hasta en 44 % de SST.

Se identificó que el agua extraída para el DR 095 representa una importante parte del agua escurrida en

el río Atoyac, sobre todo durante los meses de marzo a mayo. La extracción para el DR 095 en años más lluviosos, representa 35 % del agua escurrida en el mes de abril mientras que la extracción en años menos lluviosos, representa hasta 80 % del caudal del río Atoyac (Figura 6).

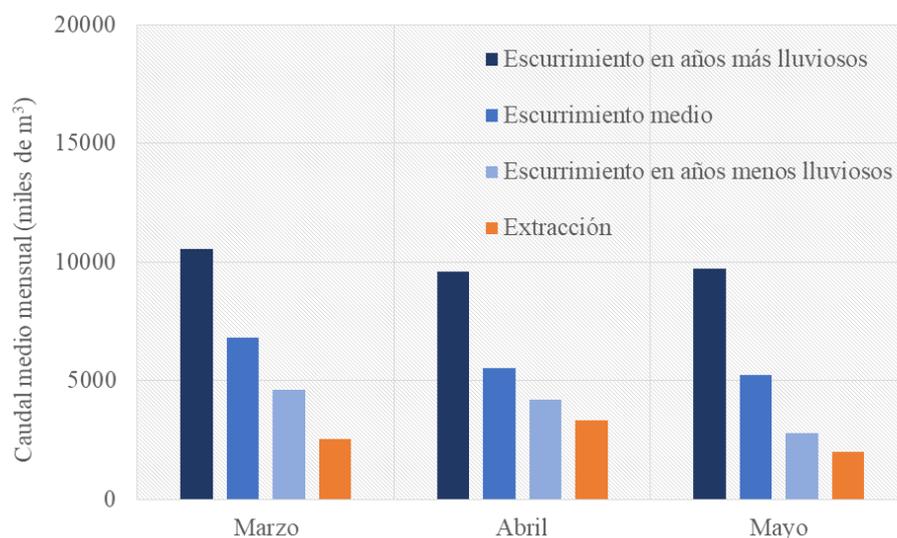


Figura 6 Caudales de extracción y de esguerrimiento en el río Atoyac, Gro. aguas arriba del DR 095

Dada la variabilidad estacional de esguerrimiento y extracción de agua del río, es primordial determinar el caudal ecológico mensual aguas debajo de la presa derivadora para el DR 095, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma mexicana “NMX-AA-159-SCFI-2012” (DOF 2012).

Se confirma la participación de los actores sociales e institucionales en estas acciones propuestas y con ello se potencializa las oportunidades de éxito del proyecto propuesto para desarrollarse como experiencia piloto en la cuenca hidrológica del río Atoyac, Gro.. El desafío ambiental que enfrenta esta cuenca ha sido caracterizado y la recomendación 56/2019 de la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH 2019) sienta un precedente relevante para la aceptación del proyecto, también por los sectores productivos. Este proyecto representa un apoyo necesario para el cumplimiento de la recomendación, la restauración ambiental y la mitigación de la presión hídrica.

## 5. ¿QUÉ SIGUE?

El problema a atenderse para la mitigación de la presión hídrica en cuencas, es en torno al

conocimiento y la gestión del ciclo socio-natural del agua para el bien común y la justicia ambiental. La problemática en cuencas hidrológicas en nuestro país es originada por la contaminación proveniente de fuentes puntuales y difusas, la pérdida de suelos, flora y fauna, la alteración de patrones hidrológicos, que afectan negativamente al ambiente y, por ende, al bienestar social y económico de las regiones.

Actualmente, al menos 70% de los cuerpos de agua monitoreados en México presentan contaminación a causa del insostenible manejo de las cuencas hidrológicas, donde la gestión de los recursos constituye un complejo desafío debido a que no son lo suficientemente comprendidos los procesos de deterioro ambiental y su repercusión sobre la presión hídrica, las escasas experiencias exitosas sobre gestión de cuencas no han sido ampliamente difundidas y la vinculación entre los sectores social, político y ambiental, ha resultado poco efectiva. Por ello, se espera desarrollar próximamente el proyecto propuesto, que sirva para atender y mitigar las causas de presión hídrica en cuencas, aplicado al río Atoyac, Gro. como experiencia piloto, que se pueda adaptar a otras cuencas del país con problemas de presión hídrica.

Tabla 4 Propuestas de mitigación a la problemática de presión hídrica en río Atoyac

Propuesta	Descripción	Beneficio en materia de reducción de emisiones contaminantes
Control de emisiones por ganadería	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de número de cabezas</li> <li>• Modificación de la dieta de ganado bovino</li> <li>• Reúso de excreta para fertilizante</li> <li>• Instalación y rehabilitación de alcantarillado para descarga de agua residual</li> </ul>	Hasta 77% de reducción de la emisión de N, 92% de P, 75% de DBO <sub>5</sub> , y 35% de SST
Alcantarillado y tratamiento de agua residual municipal en poblaciones urbanas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación de cunetas y tratamiento de escurrimiento urbano</li> <li>• Instalación y rehabilitación de PTAR</li> </ul>	Hasta 4.4% de reducción en la emisión de N, 2.4% de P, 4.8% de DBO <sub>5</sub> , y 1.6% de SST
Alcantarillado y tratamiento descentralizado de agua residual en poblaciones rurales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación y rehabilitación de alcantarillado para descarga de agua residual</li> <li>• Instalación de sistemas descentralizados de tratamiento</li> </ul>	Hasta 4.4% de reducción en la emisión de N, 2.4% de P, 4.8% de DBO <sub>5</sub> , y 1.6% de SST
Control de erosión y sedimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de número de cabezas de pastoreo</li> <li>• Control de extracción de madera</li> <li>• Reforestación</li> </ul>	Hasta 44% de reducción de la emisión de SST
Control del caudal para riego	<p>Controlar el caudal extraído mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de área cultivada</li> <li>• Cambio de cultivos</li> <li>• Mejora en la eficiencia de riego</li> <li>• Establecimiento de caudal ecológico y ambiental a nivel mensual</li> </ul>	Hasta 380% de aumento en caudal del río en época de estiaje
Consenso con actores sociales para definición de las soluciones y su desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reuniones y talleres para socialización y definición de las soluciones más apropiadas</li> <li>• Identificación de obstáculos normativos, sociales e institucionales y su efecto permanencia de las soluciones</li> </ul>	Participación social, fortalecimiento de capacidades y sostenibilidad de las soluciones

En los años sesenta surgió en el estado de Guerrero un movimiento cívico revolucionario en contra de las diferentes formas de cacicazgos existentes en la zona, y en Atoyac de Álvarez inició una guerrilla campesina. Recientemente, se experimentan nuevas formas de búsqueda de opciones democráticas y proyectos de la sociedad civil para democratizar la vida política, la economía, el acceso a los recursos naturales e incluso para detener la devastación ambiental. Todo esto debe estar presente en la proyección de nuevas iniciativas, tenerse en cuenta y formar parte de los temas de mitigación de la presión hídrica en la cuenca (Dr. José Alfredo Agudo García, 2021, Comunicación personal).

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (Convenio folio CGSRA JI083/2018) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Proyecto Fordecyt 307361). Los autores agradecen a Denise Soares Freitas y Susana Ortega López, IMTA; Martín Fierro Leyva, UAGRO;

Nohora Guzmán Ramírez, UAEM; y José Alfredo Agudo García, por su participación en estos proyectos. Se agradece también al Ronald Ontiveros Capurata y a Suhaila Elizabeth Díaz Valencia por su apoyo en la elaboración de los mapas contenidos en este manuscrito.

## REFERENCIAS

Benaman J, Armstrong N y Maidment D (1996). Modeling of dissolved oxygen in the Houston Ship Channel using WASP5 and Geographic Information Systems. Center for Research in Water Resources. Austin, Texas, USA Disponible en: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/6750> Última consulta: Junio 25, 2021

CNDH Comisión Nacional de los Derechos Humanos (2019). Recomendación No.56/2019 sobre el caso de las violaciones a los derechos humanos a un medio ambiente sano y al saneamiento del agua, por la contaminación del río Atoyac por descargas de aguas residuales municipales no controladas, y por la inadecuada gestión de los residuos sólidos urbanos, en los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez, estado de Guerrero; en agravio de quienes habitan y transitan en dichas municipalidades, México, 119 p. Disponible en: [https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2019-09/Rec\\_2019\\_056.pdf](https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2019-09/Rec_2019_056.pdf) Última consulta: Agosto 20, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (s/f). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, México, pp. 92. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf> Última consulta: Septiembre 08, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario. México, D.F. pp. 246. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/03CarcamosDeBombeoParaAlcantarilladoFuncionalHidraulico.pdf> Última consulta: Agosto 25, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (2012). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Septiembre 2012. Semarnat. México, D.F., pp. 91. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-40-12.pdf> Última consulta: Agosto 16, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (2014). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/> Última consulta: Agosto 02, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (2015). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre 2015. Semarnat. México, D.F. Disponible en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario\\_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario_2015.pdf) Última consulta: Agosto 06, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (2020). Registro Público de Derechos del Agua Disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/Repda.aspx> Consulta: agosto 02, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (2021a). Grado de presión. Sistema de Información Nacional del Agua. Disponible en <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=17> Última consulta: Agosto 02, 2021

CONAGUA Comisión Nacional del Agua (2021b). Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua. Disponible en <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=calidadAgua> Última consulta: Septiembre 14, 2021

DOF Diario Oficial de la Federación (2012). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166834/NMX-AA-159-SCFI-2012.pdf> Última consulta: Agosto 15, 2021

FCEA Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental (2017) ¿Cuánta agua hay en el planeta? Centro virtual de Información del Agua. Disponible en: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/> Última consulta: Agosto 02, 2021

- Fernández Gómez R y Fierro Leyva M (2015). Participación ciudadana y desarrollo sustentable en la recuperación de la cuenca del río Atoyac: Proyecto Pro-Regiones UNAM-UAGro. Revista Tlamati Sabiduría, 6 (4) 59-62, Disponible en:  
[http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/550/11995\\_ART2015OK.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/550/11995_ART2015OK.pdf?sequence=1&isAllowed=y) Última consulta: Septiembre 03, 2021
- Fierro Leyva M y Alcántara Valverde N (2008). Participación ciudadana y desarrollo sustentable en la recuperación de la cuenca del río Atoyac. Antología de Estudios Territoriales, Fomento de los Estudios Territoriales en Iberoamérica, segunda parte. Universidad Autónoma de Guerrero (IIEPA-IMA), 11 p. Disponible en  
<http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/3807/1/Participaci%C3%B3n%20ciudadana%20y%20de%20desarrollo%20sustentable%20en%20la%20recuperaci%C3%B3n%20de%20la%20cuenca.pdf> Última consulta: Septiembre 14, 2021
- Hansen AM, Ruiz-Castro AA, Díaz-Valencia S, Moreno-Ayala V, Díaz-Aldama E, Sandoval DA y Santana-Vega Z (2020). Dimensionamiento hidrogeoquímico para la rehabilitación de cuerpos de agua. XXX Congreso Nacional de Geoquímica, Actas INAGEQ, 26, 9-29. Disponible en:  
<https://congresogeoquimica2020.uach.mx/04%20Actas%20INAGEQ%20Vol.%2026%20XXX%20CNG%202020.0.pdf> Última consulta: Agosto 22, 2021
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2007). Anuario estadístico del estado de Guerrero. Edición 2007. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/ganaderia/> Última consulta: Agosto 15, 2021
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2010). Red Hidrográfica, escala 1:50000, edición 2.0. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/> Última consulta: Agosto 11, 2021
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2012). Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie V. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/> Última consulta: Agosto 20, 2021
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2015a). Mapa Digital de México de INEGI versión 6.3.0. Disponible en:  
<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=> Última consulta Agosto 05, 2021
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2015b). Encuesta intercensal 2015 Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/> Última consulta: Agosto 07, 2021
- INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2017). Anuario estadístico del estado de Guerrero. Edición 2017, pp. 655. Disponible en:  
[http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF\\_Docs/GRO\\_ANUARIO\\_PDF.pdf](http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/GRO_ANUARIO_PDF.pdf) Última consulta: Julio 28, 2021
- Jiménez Varela A, Méndez Bahena A, Alvarado Gómez AV, Rivera Barreto C (2000). Diagnóstico ambiental de la Cuenca del Río Atoyac, Guerrero. Altamirano, junio-julio, 2000, (16), 43-62. Disponible en:  
[Revista%20Altamirano%20No.16.Jun-Jul%202000.pdf](http://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/) Última consulta: Julio 25, 2021
- Jones DD y Sutton AL (2003). Design and operation of livestock waste lagoons. Agricultural and Biological Engineering, Purdue University, Indiana, USA
- Metcalf y Eddy (2004). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th Ed.) McGraw-Hill. New York. 1848 p. ISBN: 0070418780
- PDM Plan de Desarrollo Municipal 2015-2018 del H. Ayuntamiento Municipal Constitucional de Atoyac de Álvarez (2015). Disponible en:  
<http://promunicipio.mx/AlimentaPlataforma/Documentos/PMD%20Final.Atoyac.pdf> Última consulta: Julio 25, 2021
- SAGARPA Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2016a). SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadísticas de la producción agrícola de 2016. SAGARPA,

México. Disponible en: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> Última consulta: Agosto 18, 2021

SAGARPA Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2016b). SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Población ganadera estatal de ganado bovino cárnico de 2006 a 2015. SAGARPA, México. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera> Última consulta: Agosto 19, 2021

SAGARPA Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2016c). SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Población ganadera estatal de ganado bovino lechero de 2006 a 2015. SAGARPA, México. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera> Última consulta: Agosto 19, 2021

SAGARPA Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2016d). SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Población ganadera estatal de ganado porcino de 2006 a 2015. SAGARPA, México. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera> Última consulta: Agosto 20, 2021

Taiganides EP, Pérez ER y Girón SE (1996). Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México. Consejo Mexicano de Porcicultura, México. Disponible en <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003101250>. Última consulta: Septiembre 14, 2021

UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2021). The United Nations World Water Development Report (2021) Valuing Water, París, Francia, pp. 186. Disponible en: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021/> Última consulta: Agosto 04, 2021

Zarza LF (2021). ¿Qué es presión hídrica? Smart Water Summit 2021 <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-estres-hidrico> Última consulta: Septiembre 14, 2021



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

## Gobernanza de los recursos hídricos en Chile Reducción de la brecha regulatoria

*Governance of water resources in Chile reduction of the regulatory gap*



Carlos Estévez Valencia <sup>1\*</sup>

Recibido: 30/09/2021

Aceptado: 08/11/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Se explicita que la gobernanza del agua, cuando no es fiel a su principal vocación, cual es propender a la gestión sostenible del agua o a la seguridad hídrica, tiende a traducirse en uno de los focos principales de la crisis del agua. Se propone una reseña del avance en el ámbito legal en materia de recursos hídricos en el último lustro en Chile, y como ello contribuye o puede contribuir a reducir la brecha regulatoria e institucional respecto a la Gobernanza de los Recursos Hídricos. La brecha regulatoria e institucional, también denominada brecha de políticas en el marco de la gobernanza del agua multinivel utilizado por la OECD, ha sido considerada tanto en Chile como en la mayoría de los países de la región como un obstáculo determinante para una adecuada gobernanza de los recursos hídricos y la consecuente gestión sostenible del agua. (OECD 2011; OECD, 2012). Se describe cuáles son las principales características de esta brecha para el caso de Chile, reseñándose algunos avances relevantes contenidos en dos iniciativas de ley en trámite y en una ley de la República, aprobada en 2018. Todo lo anterior, dentro de un contexto de alta sensibilidad respecto al debate del agua, que ha ocupado un lugar relevante en los albores de la discusión de la recientemente electa Convención Constituyente, encargada de proponerle al país una nueva Constitución para que sea plebiscitada.

**Palabras clave:** Agua, gobernanza, recursos hídricos, Chile, brecha regulatoria, brecha de políticas, marco regulatorio, institucionalidad, código de aguas, gestión sostenible del agua.

### Abstract

*It is made explicit that water governance, when it is not faithful to its main vocation, which is to promote sustainable water management or water security, tends to become one of the main focuses of the water crisis. We propose a review of the progress in the legal field regarding water resources in the last five years in Chile, and how this contributes or may contribute to reduce the regulatory and institutional gap with respect to Water Resources Governance. The regulatory and institutional gap, also called policy gap in the multilevel water governance framework used by the OECD, has been considered both in Chile and in most countries of the region as a determining obstacle for an adequate governance of water resources and consequent sustainable water management. (OECD 2011; OECD, 2012). The main characteristics of this gap are described for the case of Chile, outlining some relevant advances contained in two pending bills and in a law of the Republic, approved in 2018. All of the above, within a context of high sensitivity regarding the water debate, which has occupied a relevant place at the dawn of the discussion of the recently elected Constituent Convention, in charge of proposing a new Constitution to the country to be plebiscited.*

**Keywords:** Water, governance, water resources, Chile, regulatory policy gap, policy framework, regulatory framework, institutional framework, water code, sustainable water management.

1 Asesor de Comité de Senadores en asuntos hídricos. Senado de la República de Chile. estevezcarlos.valencia@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

*La (no) gobernanza del agua es una causa relevante de la crisis hídrica*

Se ha escrito bastante sobre gobernanza del agua, gestión integrada de recursos hídricos, seguridad hídrica y gestión sostenible del agua, aunque no siempre diferenciándolos apropiadamente, quizás porque varios elementos de dichos conceptos tienden a entrecruzarse o cohabitar en más de un dominio. Se puede afirmar que las últimas dos aproximaciones son más bien finalistas, es decir, definen un objetivo a alcanzar, mientras que las primeras enfatizan su carácter instrumental, ya sea adjetivando la modalidad de gestión o explicitando la necesidad de contar con reglas, herramientas y procesos tanto políticos como administrativos para alcanzar dichos objetivos.

Al menos tres informes mundiales sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (WWDR 2006, 2015 y 2019) destacan que el foco de la verdadera crisis del agua radica en la gobernabilidad de los recursos hídricos (WWAP-UNESCO, 2006); que las vías de desarrollo no sostenibles y los fracasos de la gobernanza afectan a la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos y sus beneficios sociales y económicos (WWAP-UNESCO, 2015); y que, para progresar en la gobernanza relacionada con el agua, es imprescindible la participación, a través de estructuras de gobernanza inclusivas. Además, se precisa para el caso de América Latina y el Caribe, que resulta prioritario crear la capacidad institucional de manejar los recursos hídricos y gestionar de un modo sostenible el recurso. (WWAP-UNESCO, 2019)

A conclusiones similares se llega en el proyecto Escenarios Hídricos 2030 desarrollado por la Fundación Chile, Fundación AVINA y Futuro Latinoamericano, (FCH, 2019) donde se trabajó con actores locales de seis cuencas representativas de distintas macro zonas hídricas, utilizando escenarios hídricos tendenciales y el conocimiento de dichos actores para identificar los principales problemas hídricos y sus causas, junto con priorizar propuestas y procesos de transformación. Es así como se destaca entre las causas más frecuentes de los problemas de esas cuencas, la deficiente gestión hídrica y la gobernanza (44%), incluyendo asuntos como la falta de transparencia, la descoordinación de las instituciones a nivel de cuencas, un marco normativo e institucional inadecuado para la gestión de los

recursos hídricos, información limitada, fraccionada o contradictoria y una fiscalización insuficiente. Recién en segundo lugar (29%) aparece el elemento cuantitativo, expresado en problemas derivados del aumento de la demanda (17%) o de la disminución de la oferta (12%) y aún más abajo aparecen asuntos relacionados con la calidad del agua y su función ecosistémica o la incapacidad de prevenir adecuadamente los desastres hídricos.

Es decir, tanto desde estudios e informes internacionales, como nacionales, es posible señalar que asegurar un acceso universal al agua para todos, tanto por razones de disponibilidad como de calidad, al igual que conservar el recurso en las fuentes naturales y preservar sus funciones ecosistémicas, suele no ser una mera cuestión hidrológica o de financiamiento, sino también de buena gobernabilidad. Es por ello que gestionar la escasez del agua y los riesgos hídricos, requiere de instituciones sólidas, marcos regulatorios consensuados y mecanismos inclusivos, basando las decisiones en el conocimiento.

Toda vez que la gobernanza del agua también incluye la gestión del recurso hídrico, mejoras en la capacidad institucional, en los marcos regulatorios y en la modalidad de distribución o reparto, propiciando la inclusión de todos los actores sociales en las decisiones que les conciernen, termina por afectar aquellos elementos fundamentales en la conformación del poder en torno al agua. (Domínguez, 2006)

El objeto de una buena gobernanza de los recursos hídricos es la Gestión Sostenible del Agua, entendida esta última en los términos concebidos por la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible. (Estévez et al, 2019).

El paso desde los Objetivos del Milenio a la Agenda 2030, en materia de aguas, implicó traspasar las fronteras de los derechos humanos de acceso al agua potable, saneamiento e higiene hacia un enfoque integral que incluye a dichos derechos humanos, pero que avanza hacia una gestión sostenible de la totalidad del ciclo hidrológico. De hecho, las ocho metas del ODS 6 “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” apuntan tanto a garantizar el derecho humano de acceso a agua segura para la bebida humana y para el saneamiento e higiene, como a alcanzar la Gestión Sostenible del Agua.

El tipo de relación que se genera entre la Gestión Sostenible del Agua (GSA) y la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), dentro del marco conceptual de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible, corresponde a la que explica la conexión entre un objetivo general y un objetivo específico, donde, en el primer caso se perfila el fin o el propósito de la gestión del agua (el que sea sostenible), mientras que en la GIRH se precisa o manifiesta el modo de hacer dicha gestión, su adjetivo principal, cual es “integrar” en la gestión tanto a los múltiples actores del agua, como a las distintas fuentes naturales de aguas y a distintos enfoques y disciplinas donde, or definición, el ámbito espacial de acción es la cuenca.

Dentro de los parámetros de la Agenda 2030, la Gestión Sostenible del Agua se encuentra en el corazón de las ocho metas del ODS 6 y se complementa con al menos dos metas del ODS 11 y otras dos del ODS 15. Así resulta posible definir la GSA como aquella gestión cuyo propósito es garantizar los derechos humanos de acceso al agua potable y al saneamiento (6.1 y 6.2); mejorar la calidad de las aguas (6.3); asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua para todos (6.4); luchar contra la desertificación, la sequía y las inundaciones (15.3) y conservar, restablecer y dar un uso sostenible a los ecosistemas terrestres e interiores de agua dulce (15.1); implementando políticas que promuevan la inclusión, la mitigación del cambio climático, la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres (11.b), utilizando eficientemente los recursos hídricos (6.4), poniendo en práctica la GIRH (6.5) y mejorando la gestión del agua con un enfoque participativo (6.b).

Hemos señalado que tanto la Gobernanza del Agua como la GIRH sirven a un propósito mayor en materia hídrica, destacando al menos dos objetivos principales: la Gestión Sostenible del Agua y la Seguridad Hídrica. Se trata, por cierto, de dos enfoques privilegiados por Naciones Unidas que tienen elementos en común, aunque, por cierto, con algunos énfasis diferenciadores.

El Programa Hidrológico Intergubernamental de UNESCO define a la seguridad hídrica como “la capacidad de una determinada población para salvaguardar el acceso a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable, que permita sustentar tanto la salud humana como la del ecosistema, basándose en las cuencas hidrográficas, así como garantizar la protección de la vida y la propiedad

*contra riesgos relacionados con el agua–inundaciones, derrumbes, subsidencia de suelos y sequías”* (UNESCO, 2012).

Se trata de una definición que propende a conciliar el bienestar humano con la conservación de los ecosistemas, incorporando elementos de sostenibilidad y de gestión de riesgos a una escala de cuenca, es decir, promoviendo la gobernanza del agua desde lo local. Sin embargo, el elemento distintivo de esta aproximación es que la condición para “salvaguardar” o transformar una realidad incierta es la acción humana concertada, entendida como la capacidad de una determinada población para avanzar desde la inseguridad hídrica hacia la seguridad hídrica.

Tal como se señala en la publicación de UNESCO y CODIA “Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Implementación de políticas públicas en América Latina y el Caribe”, la acción de transformar una situación de riesgo hídrico en seguridad hídrica puede medirse en función de la capacidad social e institucional de alcanzar al menos tres fines: a) acceso sostenible a una cantidad adecuada de agua, con una calidad aceptable, a fin de posibilitar el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, b) proteger a las personas, comunidades y ecosistemas de la contaminación hídrica y desastres relacionados con el agua; y c) preservar dichos ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política. (Estévez et al, 2019)

Es por ello que, al revisar el marco regulatorio e institucional del agua de un país como Chile, se recomienda contrastar tanto sus ideas matrices y funcionamiento práctico con la sostenibilidad de la gestión del agua o, si se prefiere, con la Seguridad Hídrica.

## **2. ENFOQUE DE BRECHAS Y TEORÍA DE LA SEGUNDA MEJOR ALTERNATIVA**

El enfoque de brechas estructurales fue desarrollado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe en el documento *La hora de la igualdad: brechas por cerrar, caminos por abrir* (CEPAL, 2010) y luego en la publicación *Los países de renta media: un nuevo enfoque basado en brechas estructurales* (CEPAL, 2012), donde básicamente se planteaba que para alcanzar el desarrollo económico y social era necesario superar ciertas barreras o brechas estructurales del desarrollo. Esta

aproximación metodológica permite utilizar distintos indicadores y, de ese modo, recoger con propiedad la diversidad, heterogeneidad y particularidades de los países de la región, junto con monitorear su progreso.

Conforme a lo descrito en el documento *El enfoque de brechas estructurales. Análisis del caso de Costa Rica* (CEPAL, 2016), este ejercicio requiere identificar y priorizar, del modo más participativo posible, tanto los cuellos de botella más estructurales, como aquellos componentes determinantes y factores subyacentes que inhiben o impiden alcanzar un desarrollo sostenible. Ciertamente que la estructura social, política y económica existente, junto con el marco regulatorio e institucional de un país como Chile, pueden calzar con comodidad como factores subyacentes o elementos determinantes. Dicho documento propone la necesidad de establecer un orden jerárquico de los principales determinantes y sub-determinantes según sus respectivas líneas causales, en forma de árbol de decisión.

Este enfoque asume la denominada Teoría de la segunda mejor alternativa o *Theory of the Second Best*, en inglés (Lipsey y Lancaster, 1956), luego de hacerse evidente que, si una de las condiciones para lograr el resultado perfecto no es alcanzable, el logro de las demás condiciones no solo no serviría para alcanzar la solución óptima, sino que también podría empeorar la situación imperante. Ante ese escenario y asumiendo que no puede establecerse ex ante la mejor solución para cada país, ya que tendría que controlarse una amplia gama de variables, parece apropiado abandonar la lógica de recomendaciones económicas universales (el primer escenario) y propender a un segundo mejor óptimo, asumiendo que habrá restricciones tanto en el acceso a recursos económicos, como a la capacidad técnica y capital político.

Para el caso que nos ocupa, cabe asumir que una política pública o una reforma estructural no puede hacerse cargo de todas las brechas a la vez, razón por la cual se opta por la aproximación de la segunda mejor alternativa, con una metodología bien estructurada, participativa, flexible y transparente, que posibilita evaluar las brechas y sus determinantes en un territorio determinado y en un momento determinado y, consecuentemente, sugerir estrategias de política para cerrar las brechas identificadas como prioritarias.

En el año 2014, el Comité de Ministros del Agua, constituido a instancia de la Presidenta de la República concluyó (ex ante), sin desarrollar la

metodología recién explicada, pero recogiendo múltiples estudios e informes coincidentes, que la crisis hídrica que se vivía, exacerbada por la sequía imperante y su impacto social y político, si bien debía abordarse transversalmente con todas las herramientas disponibles, incluyendo inversiones en iniciativas hidráulicas y en servicios sanitarios rurales, era necesario priorizar políticamente, en materia de aguas, la reducción o superación de la brecha regulatoria e institucional en materia hídrica. De este modo, de superarse esta importante brecha y su consecuente restricción para la gestión del agua, el país podría identificar y priorizar otra brecha con sus respectivos factores subyacentes y determinantes.

### 3. SOBRE LA BRECHA DE POLÍTICAS EN LA GOBERNANZA DEL AGUA

Toda gobernanza de los recursos hídricos debe abordar brechas relevantes, tales como la fragmentación institucional; marcos legislativos desactualizados e insuficientes, la falta de rendición de cuentas, de transparencia, la eventual debilidad o asimetría de capacidades en los actores locales; la existencia de programas de inversiones inestables, sumado a una deficiente gestión financiera y al diseño de políticas o implementación de estrategias hídricas no basadas en información confiable.

Frente al hecho que la gobernanza del agua, con toda la complejidad y transversalidad que conlleva, constituye un desafío que la sociedad no puede abordar de modo parcial y espontáneo, los autores de la publicación de UNESCO y CODIA a la que se hizo referencia (Estévez et al, 2019), explicitan que distintos organismos especializados han aconsejado que el primer paso debiera ser identificar correctamente cuáles son los principales desafíos para la gestión y gobernanza del agua desde el territorio que se habita y, como todo desafío correctamente identificado, concluir luego de un proceso informado, participativo e inclusivo, cuáles son las mejores alternativas de solución.

Ahora bien, en cualquier territorio, incluyendo aquellos países donde existe una suerte de mercado de derechos o asignaciones de aguas, resulta difícilmente sustituible la preponderancia de la institucionalidad pública en la gobernanza del agua. Lo anterior se hace especialmente evidente si se tiene en consideración que el crecimiento económico y demográfico conduce a una mayor demanda y contaminación del agua; que tanto la salud de las

personas como la del medioambiente son afectadas por aguas de mala calidad; que las respuestas desde el mercado suelen ser limitadas en la búsqueda de sostenibilidad medioambiental; y que las organizaciones de usuarios de aguas tienden a privilegiar el criterio de cantidad por sobre el de calidad, al igual que la acción de extracción del recurso por sobre la de conservación del mismo.

En razón de lo anterior, es que se ha recomendado (Estévez et al, 2019) trabajar las siguientes líneas de acción para transitar desde la actual situación a un escenario deseado para la gestión sostenible del agua y la seguridad hídrica, en un contexto donde ya se evidencian los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico.

1. Asegurar el derecho humano de acceso a agua para la bebida, saneamiento, higiene y subsistencia;
2. Reducir la fragmentación institucional y la divergencia de objetivos políticos;
3. Definir y diferenciar con claridad roles y responsabilidades en la definición de políticas de aguas y en su implementación;
4. Fortalecer y potenciar la generación e implementación de políticas, a nivel nacional y local, que incentiven y no obstruyan una gestión sostenible del agua;
5. Gestionar de modo integrado el agua a una escala adecuada;
6. Posibilitar la asociatividad, la participación y la inclusión, en especial para los más vulnerables;
7. Implementar sistemas de información hídrica adecuados, abiertos y accesibles;
8. Desarrollar sistemas de gestión hídrica basados en el conocimiento, innovación y colaboración;
9. Incrementar la eficiencia en la gestión, haciendo más con menos agua;
10. Aprovechar tecnologías económicamente abordables y prácticas consuetudinarias adaptables a las metas de gobernanza;
11. Capacitar a autoridades y gestores del agua en función de la complejidad de los desafíos del agua a abordar.

Debido a la transversalidad de los desafíos y al hecho de que convocan a múltiples organismos públicos y privados, a un amplio abanico social, cultural y

económico, incluyendo a los pueblos originarios, comunidades del mundo rural, ciudadanos de grandes urbes, gremios de diferentes sectores productivos, organizaciones ambientales y otros, resulta particularmente complejo que las políticas públicas logren identificar y priorizar, de un modo participativo e inclusivo, tanto las brechas de gobernanza del agua, como la correspondiente estrategia de superación para hacer efectiva una gestión sostenible del agua.

Sin embargo, existen múltiples directrices de respaldo para esa tarea. Desde 2010, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE u OECD, según la sigla en inglés) comenzó a trabajar las principales brechas que obstaculizan la formulación e implementación de políticas del agua. Es así como el "Marco de gobernanza multinivel de la OCDE: *Mind the Gaps, Bridge the Gaps*" se desarrolló como una herramienta que le facilite a los diseñadores de políticas de aguas, tanto identificar los desafíos como superar las brechas de gobernanza asociadas. (OECD, 2015). Dicho marco analítico se utilizó para examinar los marcos de gobernanza del agua en 17 países de la OCDE (OECD, 2011) y 13 países de América Latina (OECD, 2012), al igual que en la realización de diálogos nacionales para la elaboración de iniciativas de apoyo a las reformas de agua en México (2013), Países Bajos (2014), Jordania (2014), Túnez (2014) y Brasil (2015), entre otros.

Sin perjuicio de que existen desafíos comunes para implementar la gobernabilidad del agua en distintos países, la diversidad geográfica e hidrológica, además de los distintos modos antrópicos de gestión, regulación e institucionalización, permite explicar por qué no existe una respuesta universal para todas las situaciones, haciéndose necesario adaptar las siete brechas de gobernanza del agua propuestas por la OCDE (OECD, 2011) a los contextos locales, asegurando la participación de los distintos actores, para su adecuada superación.

1. La de políticas, que resulta de la fragmentación institucional y deficiencia regulatoria;
2. La de información, que afecta el proceso de definiciones políticas, su implementación y evaluación;
3. La de objetivos, que resulta de la tensión entre objetivos divergentes o contradictorios entre distintas reparticiones u organismos;

4. La de capacidades, que surge de un insuficiente conocimiento científico y técnico (capacidad blanda) y de un déficit de inversión y actualización de la infraestructura (capacidad dura) para diseñar e implementar políticas del agua;
5. La de financiamiento, por ingresos insuficientes o inestables para implementar las políticas del agua;
6. La de rendición de cuentas, referida a la falta de transparencia en la formulación e implementación de políticas del agua, que afecta la confianza en la institucionalidad y la participación de las comunidades locales en la gestión del agua;
7. La administrativa, que resulta de la falta de coincidencia entre la competencia territorial de la administración política que contiene una cuenca y sus límites hidrográficos;

De modo complementario, a dichas brechas correspondería al menos agregar (Estévez et al, 2019) la brecha cultural, especialmente relevante en territorios con presencia de pueblos originarios; la brecha ambiental, en cuanto a las dificultades para una adecuada gobernanza ambiental, (BID, 2020) que incide en la gestión de las fuentes naturales de agua, habiendo una estrecha interdependencia entre la gestión del recurso hídrico y la conservación de los servicios ecosistémicos; y, por cierto, la brecha de género, que se expresa transversalmente en todas las áreas del desempeño económico, social, cultural y político.

Todas estas brechas a las que se ha hecho referencia, dicen relación con la existencia de nudos más bien estructurales que permiten explicar la dificultad de avanzar en la gobernanza del agua. En consecuencia, es útil volver a un concepto de gobernanza del agua, pero esta vez siguiendo la aproximación de Frank Jaspers, quien en su trabajo titulado *Arreglos institucionales para la gestión integrada de cuencas hidrográficas*, (Jaspers, 2003) define a la gobernanza del agua como "la capacidad social para movilizar los recursos hídricos de una forma coherente para lograr un desarrollo sostenible". Es decir, no se la entiende como la suma de procedimientos, normas e instituciones, sino como la expresión de una voluntad social ordenadora capaz de hacer, de transformar. Esto incluye la capacidad de diseñar políticas públicas orientadas hacia un desarrollo sostenible, junto con la capacidad de realizar aquello que ha sido

concordado por medio de una institucionalidad apropiada que permita, dentro de un marco sostenible, la implementación y el seguimiento de dichas políticas.

#### **4. INICIATIVAS DESPLEGADAS PARA REDUCIR LA BRECHA REGULATORIA EN CHILE**

##### *Diagnóstico preliminar*

Identificando para el caso chileno algunos contrastes entre el escenario existente y aquel políticamente deseado, en presentación hecha el 4 de septiembre de 2017, ante la Comisión de Agricultura del Senado, a propósito del debate sobre la reforma al Código de Aguas, el Director General de Aguas (Estévez, 2017) destacó los siguientes elementos como los principales que explicaban por qué la brecha regulatoria constituía un obstáculo mayor para el cambio social y la gestión sostenible del agua:

- a. Ante la gran heterogeneidad hídrica existente, el marco regulatorio e institucional aún responde con herramientas y normas homogéneas. Chile es un país con una escorrentía media de 51.218 m<sup>3</sup>/habitante/año, que corresponde a unas ocho veces la media mundial. Sin embargo, la media de las cinco regiones de la macro zona norte es de 510 m<sup>3</sup>/habitantes/año, mientras que la escorrentía media de las dos regiones de la macro zona austral corresponde a 2.340.227 m<sup>3</sup>/habitante/año.
- b. Ante los claros efectos del Cambio Climático sobre el ciclo hidrológico y su consecuente riesgo hídrico, no existe una política nacional de aguas ni un plan hidrológico para fortalecer la seguridad hídrica, la adaptación y resiliencia y la capacidad de anticipación y prevención.
- c. Más del 60% de la población habita en un territorio bajo stress hídrico, con una escorrentía per cápita inferior a los 1000 m<sup>3</sup>/habitante/año, mientras el Código de Aguas, principal instrumento regulatorio para la gestión del agua, fue diseñado para la abundancia, debiendo la autoridad conceder todos los derechos de aguas que le sean solicitados por los particulares, mientras haya disponibilidad y contando dicho cuerpo normativo solo con dos artículos referidos a la potestad administrativa de adoptar medidas extraordinarias frente a la escasez hídrica (artículos 314 y 315).

- d. Ante el imperativo de flexibilidad para la gestión de los recursos hídricos, el Código de Aguas de 1981 entrega los derechos de aprovechamiento de modo indefinido y a perpetuidad (no extinguidos ni caducables), posibilitando la sobre explotación del recurso y la ineficacia en su aprovechamiento.
- e. A pesar de que el agua se reconoce como un bien nacional de uso público en la legislación (artículos 5 del Código de Aguas, 589 y 595 de Código Civil) no se entrega suficientes atribuciones a los organismos públicos para fiscalizar un uso adecuado y sustentable del recurso ni se prioriza la vida humana, al concederse o distribuir aguas.
- f. Ante la incertidumbre hídrica y a pesar de existir importantes redes de monitoreo, no existe un sistema integrado de información hídrica, no se promueve la investigación aplicada ni la innovación en función de la gestión del recurso

con nuevas tecnologías, careciéndose de un plan estratégico con una mirada de futuro.

- g. Ante la necesidad de una Gestión Integrada del Recurso Hídrico, capaz de integrar en una misma gestión a distintos actores, distintas fuentes de agua como las superficiales y subterráneas, cantidad y calidad y las distintas funciones del recurso, existe una cuarentena de organismos con atribuciones sobre el agua con más de un centenar de funciones. Lo anterior genera descoordinación, atomización, ineficiencia, sobre otorgamiento de derechos de agua, baja fiscalización, yuxtaposiciones y desconfianza entre los actores del agua.

A continuación, en la tabla 1 se presenta un esquema que sintetiza algunos cuellos de botella en el ámbito regulatorio y que impiden la consecución de seis metas que posibilitan una mejor gestión de los recursos hídricos:

Tabla 1. Esquema con algunos cuellos de botella en el ámbito regulatorio

<b>Objetivo</b> ➔	<b>Garantizar derecho humano a Agua Potable Saneamiento</b>	<b>Mejoramiento calidad del agua y su función ecosistémica</b>	<b>Gestión eficiente y sostenible del Agua</b>	<b>Límites efectivos y exigibles a extracciones</b>	<b>información confiable y de libre acceso</b>	<b>Mecanismos participativos e inclusivos en la gestión</b>
Eventual impedimento ↓						
Constitución Política	No se regula	Respaldo limitado en Art. 19 N° 8	No se regula	No se regula	No se regula	No se regula
Respaldo legal	No existe en el actual Código de Aguas (sí en la reforma en trámite), pero implícitamente se deriva de las leyes de los servicios sanitarios urbanos (DFL N° 382/1988) y rurales (Ley 20998 de 2017	Parcialmente. Existen normas: a) primarias de calidad para consumo humano, b) de evaluación ambiental de proyectos, c) de calidad de aguas para riego, d) que impiden vertidos y riles, e) Cinco normas secundarias de calidad ambiental de las aguas y f) Atribución de la Dirección General de Aguas, de monitorear y	No se regula, aunque existe normativa dispersa que lo posibilita según el caso. Es parte de la reforma al Código de Aguas en curso.	Artículos 38, 67, 68, 299 y 300 del Código de Aguas (Ley 21064/2018)	Está regulada por la Ley 20285 de Transparencia y acceso a la información pública	No se regulan, a excepción de las Organizaciones de Usuarios de Aguas, en especial las Juntas de Vigilancia, Asociaciones de Canalistas y Comunidades de Aguas (Libro II, Título III del Código de Aguas).

		vigilar la calidad de las aguas en la fuente natural (Art. 299 del Código de Aguas)				
Respaldo reglamentario	Existen distintos reglamentos para aplicar la legislación pertinente. Se puede destacar el Decreto 50 (19.10.2020), reglamento de la Ley 20.998, que regula los servicios sanitarios rurales, toda vez que su ejecución ha sido compleja.	El reglamento de la ley de Servicios Sanitarios regula la obligación de la industria de tratar las aguas servidas. Existen diversas normas técnicas de calidad, como para agua potable (NCh 409) o para riego (NCh 1233).	No se regula	La Resolución DGA N° 1238 (21.06.2019), establece condiciones y plazos para cumplir con obligación legal de instalar y mantener un sistema de monitoreo y transmisión de información sobre extracciones efectivas en acuíferos.	Existe, de modo insuficiente.	No se regula
Respaldo presupuestario	Inversiones en Agua Potable Rural (APR) el presupuesto anual (2021) es de US\$ 250 millones	Parcialmente, el DFL 382 exige a las sanitarias urbanas el tratamiento de las aguas servidas como parte del plan de inversiones. El presupuesto fiscal contempla un sistema de monitoreo de calidad de aguas superficiales y subterráneas.	Parcialmente. En riego, un presupuesto anual estimado de USD 410 millones para obras hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y medianas y menores del Ministerio de Agricultura.	Existe en la ley de presupuestos para fiscalizadores y para el sistema de monitoreo de extracciones efectivas, pero su monto es aún muy bajo.	Existe la Red Hidrométrica Nacional, con más de 2.900 estaciones de: Calidad de Aguas, de Niveles de Lagos y Embalses, de Niveles de Pozos, de Rutas de Nieve, Glaciológicas, Fluviométricas Meteorológicas y Sedimentométricas, con un sistema expedito de acceso on line en <a href="http://www.dga.cl">www.dga.cl</a>	Existe acceso a financiamiento o para ciertas organizaciones que concursan a fondos para eficiencia hídrica y proyectos hidráulicos de la ley nacional de riego, e INDAP
Política Pública	No existe	No existe	No existe	No existe	No existe	No existe
Asociación público-privado	Existe una suerte de sociedad en comandita informal en el sistema de Agua Potable	Existe una nueva obligación para los sistemas de APR (desde 2020), de recolectar, tratar	Sistema de bonificación parcial a la inversión privada, como un enfoque de eficiencia	No existe	Es una función pública.	Existe en el sistema de APR

	Rural, donde el Estado invierte en obras y las asociaciones gestionan.	y disponer de las aguas servidas y el manejo de sus lodos.	hídrica menos centrado en el ciclo hidrológico, y más en aumentar la superficie agrícola o la producción.			
Priorización de los usos de aguas	Existe solo como una facultad.	Existe en materia de reservas.	Como una facultad en acuíferos.	No existe	No aplica	No existe
Fondos para capacitación e investigación	Subdirección de APR, capacitación	Marginal, en fondos concursables.	Marginal, en fondos concursables.	No aplica	No existe	No existe

Puede destacarse entre los principales cuellos de botella que provienen del marco regulatorio vigente, el hecho de que exista:

1. Una férrea protección dominical a los derechos de aguas (indefinidos y perpetuos), amparada de la Constitución vigente y que limita la actuación de la Administración para limitar su ejercicio en función del interés público. La Constitución Política de la República garantiza, en el inciso final del artículo 19 N° 24 que “Los derechos de los particulares sobre las aguas, reconocidos o constituidos en conformidad a la ley, otorgarán a sus titulares la propiedad sobre ellos”;
2. Un doble sistema de registro de derechos de aguas (Registro de Propiedad del Conservador de Bienes Raíces y Catastro Público de Aguas), sin existir sanciones por la falta de inscripción ni una clara relación funcional entre ellos;
3. Una regulación que favorece la función productiva de las aguas, más que su función ecosistémica o la priorización del uso para consumo humano, saneamiento e higiene;
4. Un marco regulatorio e institucional que responde a los desafíos de heterogeneidad hidrográfica y variabilidad hídrica con fragmentación institucional y herramientas homogéneas, diseñadas originalmente para aguas superficiales;
5. Una débil presencia del Estado en la gobernanza de las aguas, luego de concederse los derechos de aguas a los privados, con escasos mecanismos para fiscalizar su cumplimiento y resolver inequidades en el acceso al agua y su distribución.

Justamente, y en función de lo antedicho, el debate regulatorio, vinculado con el agua en Chile, principalmente se ha centrado en propuestas de reforma constitucional, proyectos de ley de reforma al Código de Aguas y en la necesidad de contar con una nueva institucionalidad hídrica.

#### *Modificación de la institucionalidad en materia de aguas*

Chile, al igual que la mayoría de los países de América Latina y El Caribe, comparte con sus vecinos la necesidad de hacerse cargo de problemas de escasez de recursos hídricos, producto de la disminución de las precipitaciones y del aumento de la demanda sobre el recurso. Igualmente debe lidiar con afectaciones a la calidad del agua, con prestaciones de servicios de agua potable y saneamiento no siempre adecuadas (particularmente en el ámbito rural), con eventos meteorológicos extremos, con la necesidad de mejor infraestructura hídrica y, por cierto, con una fragmentación institucional de la gobernanza del agua.

Según Dourojeanni (2016), los países de América Latina tienden a resistirse a revisar con periodicidad su legislación de aguas, de modo de adaptarse o anticiparse a los cambios que derivan del cambio climático, de los avances tecnológicos o del crecimiento demográfico y económico. Agrega que la transición o el paso desde la resistencia al cambio, por parte de usuarios o actores del agua, de ser exitoso, suele involucrar cuatro etapas:

- a. “negación” de la característica estructural e integral del problema;
- b. “apropiación o acumulación” (legal o ilegal) de aguas, como respuesta a la amenaza;

- c. “asimilación” de que la inacción puede ampliar la amenaza y vulnerabilidad; y
- d. “aceptación” a que, si no se trabaja mano a mano con otros actores, será imposible abordar de manera seria estos desafíos sin exponerse a daños, degradación y conflictos difícilmente reversibles.

Si retrocedemos una década y tenemos a la vista el reporte de la OCDE sobre la Gobernabilidad del Agua (OECD, 2012), resulta que en Chile 12 autoridades participan en la formulación de políticas del agua en el nivel de gobierno central, solo superado por Perú (13) y muy por encima de Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Brasil, que le seguían con siete autoridades involucradas. Por otra parte, si se considera cuántas autoridades participaban en la regulación del agua a nivel central, Chile y Perú empataban con 10, seguidos por nueve autoridades en República Dominicana y siete en Panamá y Honduras.

Y si bien esa realidad ha evolucionado en algunos países, no ha sido el caso de Chile, donde en la actualidad existen 10 ministerios relacionados con la Gestión del Recurso Hídrico:

El Ministerio de Obras Públicas, a cargo de estudiar, planificar, proyectar, construir, conservar y explotar la infraestructura pública, contiene cinco servicios directamente relacionados con la gestión del agua:

- La Dirección General de Aguas (DGA), que promueve la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente; mantiene, opera y difunde los datos del servicio hidrométrico nacional; coordina las investigaciones sobre aguas que cuenten con recursos públicos; ejerce la policía y vigilancia de cauces y acuíferos; y supervigila el funcionamiento de las organizaciones de usuarios de aguas; (Art. 299 del Código de Aguas)
- La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), que provee servicios de infraestructura hidráulica que permiten el aprovechamiento del agua; ([www.doh.gov.cl](http://www.doh.gov.cl))
- La Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales que cuenta con las atribuciones fijadas en la Ley 20998 de Servicios Sanitarios rurales;
- La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) a cargo de la fijación de tarifas de los

servicios de agua potable y alcantarillado que prestan las empresas sanitarias, el otorgamiento de concesiones, la fiscalización de las empresas sanitarias y de los establecimientos industriales generadores de residuos industriales líquidos. (<https://www.mop.cl/Direccionesyareas/siss>)

- El Instituto Nacional de Hidráulica (INH) a cargo de investigar y modelar obras hidráulicas, marítimas y sanitarias.

El Ministerio de Energía, a cargo de elaborar y coordinar planes, políticas y normas para el buen funcionamiento y desarrollo del sector energético, incluyendo la generación hidroeléctrica y la consecuente planificación de cuencas. ([www.energia.gob.cl](http://www.energia.gob.cl))

El Ministerio de Agricultura, responsable de fomentar y coordinar la actividad silvoagropecuaria; y de conservar, proteger y acrecentar los recursos naturales renovables. ([www.minagri.gob.cl/acerca-de-minagri-quienes-somos/](http://www.minagri.gob.cl/acerca-de-minagri-quienes-somos/)) Destacan entre sus organismos:

- El Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), que apoya el desarrollo de la agricultura, bosques y ganadería, y protege y mejora la salud de animales y vegetales.
- El Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) fomenta el desarrollo productivo y sustentable de la pequeña agricultura, promueve su desarrollo tecnológico y ofrece bonos para subsanar problemas frecuentes de origen hídrico.
- La Comisión Nacional de Riego (CNR) que administra la Ley N° 18.450 para el fomento de la inversión privada en obras de riego y drenaje.
- La Corporación Nacional Forestal (CONAF), a cargo de la conservación, incremento manejo y aprovechamiento de los recursos forestales y de la conservación y gestión de parques y reservas nacionales. ([www.minagri.gob.cl/institucion/conaf/](http://www.minagri.gob.cl/institucion/conaf/))
- El Centro de Información de Recursos Naturales.

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo, que vela por los Planes de Ordenamiento Territorial, los de inundaciones urbanas y otras materias relativas a la gestión de aguas lluvias en ciudades para redes secundarias.

El Ministerio de Defensa, de quien depende la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), organismo responsable de la información y previsión meteorológica. A su vez, la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas es quien autoriza las “concesiones marítimas”, permiso que se requiere para instalar una planta desalinizadora, entre otras solicitudes.

El Ministerio de Salud, que vela por el respeto a las normas de calidad primaria de las aguas, relacionadas con los niveles aceptados para su consumo por la población.

El Ministerio de Medio Ambiente, encargado del diseño y aplicación de políticas, planes y programas ambientales, de la protección y conservación de la diversidad biológica y de los recursos naturales renovables e hídricos, siendo también responsable de la elaboración de las normas secundarias de calidad del agua. (<https://mma.gob.cl>) Se relacionan funcionalmente con este ministerio el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente.

El Ministerio del Interior, que tiene relación con actuaciones de mitigación frente a la inseguridad hídrica y que financia, a través de fondos de emergencia, acciones para asegurar el acceso al agua potable para consumo humano en sectores rurales con severas bajas en la disponibilidad hídrica o con problemas de extracción o distribución del recurso hídrico.

El Ministerio de Relaciones Exteriores, que financia al Comité Nacional del Programa Hidrológico Intergubernamental y donde radica la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), cuya misión es preservar y fortalecer la integridad territorial del País, especialmente en materias de fronteras y límites. Dicha Dirección coordina a la Dirección General de Aguas (MOP) y a otras reparticiones respecto al tratamiento de los recursos hídricos transfronterizos, pero más enfocado en morigerar potenciales conflictos binacionales que en desarrollar una gestión compartida de las aguas.

El Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, a cargo del diseño, formulación, coordinación, implementación y evaluación de las políticas, planes y programas destinados a fomentar y fortalecer el sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación, orientando al desarrollo sostenible del país y a la generación de conocimiento como resultado de investigación de base científico-tecnológica. ([www.minciencia.gob.cl](http://www.minciencia.gob.cl))

En virtud de un convenio de cooperación suscrito entre el Gobierno de Chile y el Banco Mundial, se desarrolló, por intermedio del Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible del Banco Mundial para América Latina y el Caribe, en cooperación con la Dirección General de Aguas, un Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos (Banco Mundial, 2011), un Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua (Banco Mundial, 2013) y un Plan para el mejoramiento institucional del agua en Chile (2014).

Uno de los hallazgos del diagnóstico de 2011 fue que en Chile existían 43 actores institucionales vinculados con el agua, incluyendo organismos de Gobierno, Organizaciones de Usuarios de Agua y organismos autónomos que participaban en la ejecución de 102 funciones necesarias para la gestión del agua.

Además, en dichos informes se concluyó en la necesidad de contar con una estrategia a largo plazo, en dos etapas: a) resolución de los retos más urgentes en la Dirección General de Aguas (DGA), dentro del marco institucional vigente y b) resolución de problemáticas más estructurales que requieren modificaciones legales e institucionales de fondo y que involucran cambios administrativos, reglamentarios y legales de mayor profundidad, recomendándose, en consecuencia, modificaciones institucionales que involucraban reformas legales de mayor envergadura. (Banco Mundial, 2013) Para este efecto seleccionaron tres posibles escenarios de reforma: a) fortalecimiento de la institucionalidad actual, empoderando a la DGA, junto con medidas de mejor coordinación y de mejoras en el financiamiento para cambiar su desempeño; b) una Agencia Nacional del Agua; y c) una Subsecretaría de Recursos Hídricos en el Ministerio de Obras Públicas, que fue la alternativa recomendada.

Este informe caló hondo en los principales actores del agua que, a nuestro juicio erróneamente, si bien favorecieron avanzar hacia una mejor institucionalidad del agua, fueron tomando partido por alguna de estas aproximaciones. Consideramos que constituye un error iniciar el debate público con la fórmula orgánica y su inserción institucional (el qué y el dónde), ya que podía conducir a un bloqueo de posiciones, cuando era más lógico partir con otras de las preguntas básicas, tales como ¿por qué una nueva institucionalidad?, ¿para hacer qué?, ¿cómo se llevaría a cabo?, incluyendo la factibilidad política, financiera, jurídica y legislativa para avanzar desde lo

existente a lo propuesto; y, finalmente, ¿con quiénes?, es decir cuál sería la política de alianzas y cómo se coordinarían distintas instituciones públicas, distintos órdenes de gobierno y otros actores del agua, tanto a nivel central como local.

El Banco Mundial, en su informe de junio de 2014 “Plan para el mejoramiento institucional del agua en Chile: propuesta de creación de una Subsecretaría de Recursos Hídricos”, reafirmó la necesidad de una Subsecretaría de Aguas al interior del Ministerio de Obras Públicas, respaldándose en “las evidentes ventajas desde la perspectiva de su posición al interior del Gobierno, las competencias técnicas existentes y su implementación práctica.” (Banco Mundial, 2014).

El 14 de octubre de 2014, la Presidenta del Senado remitió el Oficio 1.187 a la Presidenta de la República, comunicándole que, por unanimidad de los miembros de esa Corporación, se le solicitaba el envío de una iniciativa legal que cree la Subsecretaría de Recursos Hídricos, dependiente de un Ministerio de Obras Públicas y Recursos Hídricos.

En noviembre de ese mismo año, el Comité de Ministros del Agua, instancia de coordinación interministerial ordenada por la Presidenta de la República (integrada por los ministros de Obras Públicas, Agricultura, Medio Ambiente, Minería y de Energía, además del Delegado Presidencial del Agua y, en calidad de Secretario Ejecutivo, el Director General de Aguas), estudió esta solicitud, junto con una similar de la Cámara de Diputados y el propio Informe del Banco Mundial.

Para estos efectos, se le encargó al Director General de Aguas la elaboración de una propuesta como la solicitada, que considerase una arquitectura detallada de la nueva institución, incluyendo a nivel nacional la definición de Servicios y/o departamentos que la compondrán, detallando funciones, responsabilidades, planta de recursos humanos, una estimación presupuestaria y mecanismos de coordinación interministeriales y con reparticiones regionales y/o locales. Además, se le encargó considerar la alternativa menos invasiva con las distintas reparticiones vinculadas a la gestión del agua, determinando los textos legales a modificar, junto con un diseño de un proceso de implementación de la reforma propuesta.

En marzo de 2015 el Comité de Ministros del Agua concordó en una Subsecretaría del Agua, dentro de un Ministerio de Obras Públicas y Aguas, bajo cuya

dependencia estarían la Dirección General de Agua, la Dirección de Obras Hidráulicas, el Instituto Nacional de Hidráulica, la Superintendencia de Servicios Sanitarios y una Dirección de Agua Potable Rural. Esta Subsecretaría dependería funcionalmente del Comité de Ministros del Agua, que presidiría el Ministro de Obras Públicas y Aguas, instancia donde se sancionaría la propuesta de presupuestos del sector agua, la Política Nacional del Agua y un Plan Nacional Hidráulico. Existiría un Comité Técnico Interministerial del Agua y un Consejo Nacional del Agua, compuesto por representantes territoriales y funcionales y asociaciones gremiales vinculadas con la gestión del agua, quienes, en conjunto, deberían visar la propuesta de Política Nacional del Agua.

En abril de 2015 se envió al Ministerio Secretaría General de la Presidencia el ante proyecto de ley y al Ministerio de Hacienda, organismo que debía elaborar el correspondiente informe financiero, sin el cual ningún proyecto de ley del Ejecutivo puede tramitarse en el Congreso. El ante proyecto de ley nunca salió del patio del poderoso Ministerio de Hacienda.

Cuatro años más tarde, durante el segundo mandato del Presidente Piñera, el Ministro de Obras Públicas convocó a una Mesa Nacional del Agua (MNA), con representantes gubernamentales, parlamentarios, organismos gremiales y otros actores. En la sesión del 14 octubre de 2019 se expusieron cuáles eran los 4 objetivos principales de esa instancia [Ver Acta N° 1 de la MNA en [https://www.mop.cl/MesaAgua/docs/2019%2010%2015\\_Acta%20Sesion%20N1.pdf](https://www.mop.cl/MesaAgua/docs/2019%2010%2015_Acta%20Sesion%20N1.pdf)]

- I. elaborar un diagnóstico compartido sobre el problema del agua en Chile,
- II. establecer contenidos centrales de una política hídrica de largo plazo,
- III. proponer la infraestructura hídrica necesaria y la forma de gestión del agua en las cuencas en el mediano y largo plazo y
- IV. definir los principios básicos del marco legal e institucional.

En el acta de la Sesión N° 9 de la MNA, del 6 de enero de 2020, se “acordó constituir una Mesa Técnica para abordar el eje institucionalidad pública”, escuchándose a académicos, al propio Banco Mundial, al Ministro de Obras Públicas del gobierno anterior, al ex Director General de Aguas y otros actores, consolidándose la postura de crear una

Subsecretaría de Recursos Hídricos dentro del Ministerio de Obras Públicas, además de otra minoritaria y partidaria de crear un Consejo Nacional del Agua, como organismo políticamente autónomo. [Ver Acta N° 9 en [https://www.mop.cl/MesaAgua/docs/2020%2001%2006\\_Acta%20Sesion%20N9\\_VF.PDF](https://www.mop.cl/MesaAgua/docs/2020%2001%2006_Acta%20Sesion%20N9_VF.PDF)]

En la sesión del 24 de agosto de 2020 de la Mesa Nacional, la Mesa Técnica de Institucionalidad Pública del Agua expuso la Propuesta de mejoramiento institucional, presentando ambas posiciones con sus fundamentos: a) una Subsecretaría de Recursos Hídricos dentro de un Ministerio de Obras Públicas y Recursos Hídricos, más un Consejo Nacional del Agua, una Comisión de Ministros del Agua y un Panel de Expertos y b) una Comisión Nacional del Agua, bajo un Consejo Nacional del Agua, con consejos regionales y una Superintendencia del Agua. [Ver Acta N° 26 de la MNA en <https://www.mop.cl/MesaAgua/docs/26.pdf>]

En la sesión del 29 de marzo de 2021 se informó a la MNA que el Presidente de la República había presentado al país las ideas matrices del proyecto de ley que remitiría al Congreso Nacional, consistente en una Subsecretaría de Recursos Hídricos en el Ministerio de Obras Públicas y Recursos Hídricos; además de una instancia denominada Consejo Nacional de Recursos Hídricos; una Comisión de Ministros de Recursos Hídricos, para la adecuada coordinación interministerial; un Comité Técnico de Recursos Hídricos; un Panel de Expertos y una División de Información Hídrica en la nueva Subsecretaría. Se expuso que la institucionalidad de aguas deberá elaborar una Política de Recursos Hídricos, un Plan Nacional de Recursos Hídricos y una propuesta de gobernanza de cuencas. [Ver Acta N° 49 en <https://www.mop.cl/MesaAgua/docs/acta49.pdf>]

Finalmente, el 29 de junio de 2021 el Senado recibió formalmente un Mensaje presidencial con el proyecto de ley en cuestión, el cual fue enrolado con el Boletín 14446-09, acordando la Sala remitirlo a la Comisión de Obras Públicas para su estudio e informe.

En síntesis, después de seis años de discusión pre legislativa, un gobierno de signo político contrario al que le antecedió, recogió los ejes centrales de la propuesta anteriormente trabajada en materia de nueva institucionalidad, habiendo un creciente consenso en que es una propuesta necesaria para la gobernanza del agua desde el nivel central, pero aún

insuficiente para la gestión del agua en el orden local, presumiéndose que habrá indicaciones en esa línea. Complementariamente, al discutirse en particular, probablemente se volverá a discutir si la idea de una Subsecretaría en ese ministerio es apropiada, abriéndose alternativas para instalarlo dentro del Ministerio de Medio Ambiente o en una instancia con mayor autonomía del Gobierno. Sin perjuicio de ello, al ser una iniciativa legal exclusiva del Ejecutivo (en todo lo que conlleve recursos y nuevas atribuciones públicas), se presume que seguirá su tramitación en el Senado a la espera de la asunción de un nuevo gobierno en marzo de 2022.

#### *Reforma al código de aguas*

Entre las principales brechas de la gestión sostenible del agua destaca la de carácter normativa, donde la Constitución vigente y el Código de Aguas de 1981 han sido emblemas de lo que Chile ya no quiere más. De hecho, en el texto de la actual Constitución, la palabra “aguas” solo se encuentra dos veces y ambas en el Art. 19 N° 24 referido a la propiedad.

El Código de Aguas de Chile data de 1981 y fue diseñado en un escenario de abundancia, donde la escasez hídrica, la prioridad para el consumo humano, la prestación de servicios rurales de saneamiento, la preservación ecosistémica, la transparencia de la información, el control de extracciones y la necesaria adaptación al cambio climático no fueron un componente del debate regulatorio en el seno de la Junta Militar de Gobierno.

Este Código y parte de su núcleo eidético ha sido ampliamente cuestionado por expertos nacionales e internacionales y por una amplia mayoría social. No asume el problema de la creciente escasez hídrica, debilitó la noción de interés público, mercantiliza la regulación de los títulos de aprovechamiento de aguas, restringe la capacidad de administración y fiscalización pública y entrega a los “dueños” de derechos de aguas la decisión de cuánto y cómo explotar, distribuir y proteger las fuentes naturales y la calidad del recurso. Bajo su marco regulatorio se permitió el sobre otorgamiento de concesiones administrativas o derechos de aprovechamiento y la consecuente sobre explotación del recurso, aumentada por las débiles atribuciones que la ley entregaba a la autoridad en materia de fiscalización de extracciones ilegales y el bajo monto de sus sanciones.

A principios de la década del 90' se ingresó a trámite un proyecto con modificaciones sustantivas al Código de Aguas, pero llegó a puerto bastante mermado, en 2005, luego de 13 años de discusión, aunque con algunas disposiciones relevantes, como las referidas al establecimiento de un caudal ecológico mínimo y al cobro de una patente por tenencia ociosa de derechos de aguas.

A partir de 2010 brotó una oleada de propuestas legislativas que coincidieron con una prolongada sequía en el centro y norte del país, destacando entre ellas:

- una Moción parlamentaria de 2011 (Boletín 7543-12), que buscaba intensificar el concepto de uso público de las aguas y hacer temporales las actuales concesiones indefinidas de derechos, invocando mecanismos de caducidad para los derechos que existiesen en fuentes naturales que se declarasen como agotadas; y
- un Mensaje del Ejecutivo de 2012 que incrementaba los umbrales sancionatorios frente a contravenciones a las disposiciones del Código de Aguas y que, si bien en su primer año de tramitación logró ser aprobado en la Cámara de Diputados, luego en el Senado no fue objeto de discusión.

El año 2014 la Presidenta Michelle Bachelet, al inicio de su segundo mandato, encomendó al Ministro de Obras Públicas que se elabore una propuesta de reforma sustantiva al Código de Aguas y que se patrocine y presente indicaciones al proyecto de ley por el que se creaban los Servicios Sanitarios Rurales. Esta última ley que comprometía a la Administración con inversiones y apoyo a la gestión de los comités y cooperativas rurales para el acceso al agua potable y el saneamiento de sus aguas servidas, fue promulgada el 6 de febrero de 2017.

Como la última reforma al Código de Aguas (2005), tuvo una tramitación de 13 años, el Comité de Ministros del Agua, recientemente creado, acordó en mayo de 2014 patrocinar y hacer indicaciones sustantivas a proyectos de ley que se encontraban en trámite, a fin de buscar convergencias de propósitos con los autores de la moción parlamentaria (Boletín 7543-12) ingresada en 2011 y que aún se encontraba en discusión en su primer trámite constitucional (Sala de origen). Complementariamente, se acordó reducir parte del tiempo de tramitación, aprovechando que otro proyecto de ley, iniciado por el Ejecutivo el año 2012, ya había superado la tramitación en la Cámara

de Diputados y se encontraba en el Senado, aunque inactivo. Este proyecto de ley (Boletín 8149-09) aumentaba las sanciones a las contravenciones a las normas del Código de Aguas. El Comité de Ministros del Agua encomendó al entonces Director General de Aguas, conducir la tramitación de ambas iniciativas en el Congreso Nacional.

#### *Reforma al Código de Aguas en materia de información, fiscalización y sanciones*

El proyecto de reforma al Código de Aguas ingresado en 2012 por el Ejecutivo y que incrementaba las bajas sanciones existentes en dicho código, fue objeto de importantes enmiendas en el Senado a partir de las indicaciones del Ejecutivo ingresadas en agosto de 2016.

Dicha iniciativa de ley buscaba responder a crecientes conflictos emergentes que se agravaban con una larga sequía y respuestas desde las extracciones ilegales, donde los usuarios diligentes solicitaban a la Dirección General de Aguas (DGA) fiscalizar y sancionar, toda vez que ante contravenciones evidentes, la autoridad administrativa debía remitir los antecedentes a tribunales civiles que, por disposición legal, solo podían aplicar multas bajas que no se traducían en reales disuasivos y que, además, se tramitaban latamente por los tribunales.

El proyecto de ley, finalmente promulgado, buscaba:

- a. aumentar las sanciones por extracciones no autorizadas de aguas y por otras infracciones a la normativa vigente en materia de recursos hídricos, tipificando las infracciones en cinco grados, con sanciones preestablecidas según su gravedad y con agravantes y atenuantes a considerar en la ponderación de las multas dentro de cada grado;
- b. fortalecer las potestades fiscalizadoras y sancionatorias de la DGA en la materia;
- c. mejorar la cantidad y calidad de la información sobre recursos hídricos y derechos de aprovechamiento de aguas; y
- d. ampliar las atribuciones de la DGA respecto a la conservación de la calidad de las aguas en sus fuentes naturales

Las indicaciones presentadas en agosto de 2016 también recogieron la Evaluación del Desempeño Ambiental de Chile (CEPAL/OECD, 2016), aprobada por la OCDE el 10 de marzo de 2016. De las 54

recomendaciones que se hizo para el período 2016-2025, con el objeto de ayudar al país a lograr una economía más verde, y a mejorar la gestión y la gobernanza ambiental, con especial hincapié en las políticas relativas al cambio climático y diversidad biológica, diez de ellas se vinculaban a la gobernanza de los recursos hídricos, destacando, para estos efectos, las siguientes tres:

- a. Reformar el régimen de asignación de aguas y asegurar el establecimiento de límites efectivos y exigibles a las extracciones, en concordancia con un sistema de aprovechamiento sostenible y las exigencias ambientales y ecológicas;
- b. Reforzar medidas de fiscalización y sanciones aplicables a las extracciones ilegales;
- c. Perfeccionar el monitoreo de la contaminación del suelo y de la extracción de agua para proteger los ecosistemas, en particular los humedales.

Dichas recomendaciones fueron discutidas y consideradas en el Comité de Ministros del Agua antes de ingresar el Mensaje del Ejecutivo con las indicaciones que se propuso al proyecto que se tramitaba en el Senado. Hasta entonces, el proyecto aprobado en la Cámara de Diputados, aumentaba las sanciones, pero mantenía en los tribunales de justicia la competencia de aplicar las multas, sin fortalecer las atribuciones de la DGA en materia de fiscalización ni considerar nuevas normas en materia de información.

Según presentación hecha por el Director General de Aguas, Carlos Estévez, a la Comisión Especial de Recursos Hídricos, Desertificación y Sequía del Senado, el miércoles 10 de agosto de 2016 y desde la perspectiva de contribuir a superar la brecha regulatoria para la gobernanza del agua, el Ejecutivo, que paralelamente patrocinaba una reforma más sustantiva al mismo Código en la Cámara de Diputados, partió del siguiente diagnóstico:

1. Deficiencias de información. La DGA tiene escasas facultades para obtener información de los usuarios de aguas, sobre sus niveles de extracciones, ya que el incumplimiento de esta obligación no conlleva sanciones. Esto es especialmente relevante en cursos de aguas superficiales declarados agotados en materia de disponibilidad hídrica y en acuíferos que han sido declarados como áreas de restricción o como zonas de prohibición. La información de extracciones en tiempo real que se propone, junto con la necesaria actualización del balance

hídrico, el aprovechamiento de importantes estudios hidrológicos e hidrogeológicos y los datos resultantes de una ancha red de monitoreo, es fundamental para planificar y proteger el desarrollo del recurso.

2. Problemas de Fiscalización. La gobernanza del agua requiere contar con herramientas de fiscalización para asegurar su buen ejercicio. La insuficiencia de la dotación de fiscalizadores se agrava por la debilidad de sus atribuciones: no pueden acceder libremente a predios o cauces; cerrar o paralizar obras ilegales, no son considerados ministros de fe, relativizándose el valor probatorio de las actas de fiscalización y no cuentan con la atribución de pedir directamente el auxilio de la fuerza pública para su mejor cometido, diluyéndose parte de los principios de sorpresividad e inmediatez, propios de esas actuaciones.
3. La existencia de un débil sistema de sanciones en el Código de Aguas. Antes de esta reforma legal, todas las contravenciones que no contaban con sanciones específicas (que de hecho eran todas, salvo dos), debían resolverse en los juzgados civiles, los cuales no podían multar las infracciones por sobre las 20 Unidades Tributarias Mensuales (UTM), actualmente equivalentes a USD 1,300 lo cual no se condice con los beneficios económicos que puede conllevar la usurpación y el incumplimiento de la legislación de aguas.

Existía una gran diferencia entre la regla general y las dos excepciones que contemplaba la ley, tanto en materia procedimental, como por el valor de las multas. Es así como la DGA podía multar administrativamente a quien realizare obras de intervención en cauces sin autorización, hasta por mil Unidades Tributarias Anuales (UTA), es decir 650 millones de pesos chilenos a la fecha de diciembre de 2021 o 775 mil dólares americanos (USD 775,000). La reforma convertiría en regla general esa norma especial de sanciones administrativas susceptibles de reclamarse ante las Cortes de Apelaciones y graduando las multas entre 10 y 2,000 UTM, es decir, entre USD 650 y USD 1,550,000.

Este proyecto de ley culminó su tramitación legislativa en octubre de 2017 y luego de su examen de constitucionalidad fue publicado en el Diario Oficial como Ley N° 21.064, el 27 de enero de 2018. Consta de tres artículos permanentes (según los cuerpos legales que modifica) y uno transitorio. El

artículo 1° contiene 37 numerales que modifican el Código de Aguas, el artículo 2° contiene tres numerales que modifican el Código Penal y el artículo 3° modificó el artículo 166 del Código Procesal Penal. Tal como se deriva de lo antedicho, las principales modificaciones efectuadas Código de Aguas pueden sintetizarse en torno a tres ejes:

En materia de información, todas las Organizaciones de Usuarios y los titulares de derechos de aprovechamiento de aguas que extraigan aguas superficiales directamente del cauce natural, están obligados a instalar -a su costo- dispositivos que permitan controlar y aforar el agua, además de un sistema de transmisión instantánea de la información, cuyos datos deben ser entregados a la DGA (artículo 38). El incumplimiento de esta obligación traerá aparejada una sanción económica. Lo mismo aplica (artículo 67) para los titulares de aguas subterráneas sobre acuíferos declarados como áreas de riesgo o como zonas de prohibición, los que además deberán controlar niveles freáticos y transmitir la información que obtengan.

Habiendo transcurrido tres años desde la publicación de esta ley, el Monitoreo de Extracciones Efectivas (MEE) ya se encuentra funcionando progresivamente, conforme a los plazos establecidos por la autoridad. El sistema de monitoreo de extracciones se puede revisar en <https://dga.mop.gob.cl/controlExtracciones/Paginas/documentos.aspx>

En fiscalización, se fortalecieron tanto las atribuciones de la DGA como su capacidad para hacer cumplir sus resoluciones. Por ejemplo, los fiscalizadores de la DGA podrán realizar inspecciones en terrenos privados, previa resolución administrativa que los autorice, y tendrán el carácter de ministro de fe respecto de los hechos que se consignen en sus actas (el Acta de Fiscalización tiene mérito ejecutivo y presunción legal probatoria), pudiendo el fiscalizador, además, ordenar la paralización de obras en caso de extracción ilegal de aguas. A lo anterior se suman las nuevas competencias fiscalizadoras en materia de afectación a la calidad de las aguas y el establecimiento de un procedimiento reglado, con garantías de transparencia, pudiendo quien se sienta afectado, recurrir ante la Corte de Apelaciones competente.

Se crea un nuevo párrafo de sanciones, compuesto de seis artículos, multiplicándose hasta en 100 veces el monto de las multas y creándose sanciones penales. Se tipifican distintas contravenciones con multas

asociadas al tipo de infracción cometida, estableciéndose cinco grados, según la gravedad de la infracción, con un rango mínimo y máximo dentro de cada grado. Aquellas infracciones asociadas a multas de primer grado, se refieren a la falta de entrega de información a la DGA, en la forma y oportunidad que define la ley o la propia autoridad, por medio de una resolución o a la negativa de un propietario o poseedor de un predio, que niegue injustificadamente el ingreso de los funcionarios de fiscalización en el cumplimiento de sus labores. Las de segundo y tercer grado se refieren a la negativa reiterada a instalar un sistema de monitoreo y transmisión de las extracciones. Las infracciones de cuarto grado se refieren a la comisión de actos u obras ejecutadas sin el permiso de la autoridad competente y que afectan la disponibilidad de las aguas y las de quinto grado se refieren a los titulares que maliciosamente generen dobles inscripciones en el Registro de Propiedad de Aguas. Todos estos montos se pueden aumentar en virtud de circunstancias agravantes hasta en un 100% cuando la infracción afecte la disponibilidad de aguas para consumo humano.

El texto completo de esta reforma legal se puede encontrar en el siguiente link: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1114175>

*Reforma al Código de Aguas. Intensificación del carácter público de las aguas y otras disposiciones*

El otro proyecto de ley de modificación al Código de Aguas se inició como moción parlamentaria el año 2011, discutiéndose en profundidad en la Comisión de Recursos Hídricos y Desertificación de la Cámara de Diputados, sin alcanzar a votarse antes de que el 8 de octubre de 2014 fuese objeto de una indicación sustitutiva del Ejecutivo, reemplazando en su totalidad dicha iniciativa, aunque manteniendo las ideas matrices del proyecto original.

Se promueve un equilibrio entre el derecho humano de acceso al agua potable y saneamiento con la preservación ecosistémica y el desarrollo productivo; consagra los derechos humanos de acceso al agua potable y al saneamiento y los prioriza sobre otros usos; mantiene la certidumbre de los derechos de aprovechamiento ya concedidos, se profundiza la función ecosistémica de las aguas, prohibiéndose extracciones en glaciares y áreas declaradas bajo protección oficial de la biodiversidad; se consagra el principio de sustentabilidad del acuífero, limitando la explotación de aguas subterráneas cuando se afecte dicha sustentabilidad; se establecen medidas

inhibitorias a la tenencia ociosa y especulativa de derechos de aprovechamiento (tales como la extinción y caducidad de derechos de aprovechamiento de aguas), a fin de que ante su aprovechamiento ineficiente, sean devueltos a la sociedad; y se facilita la regularización y formalización de miles de usos ancestrales de aguas.

El 20 de octubre de 2015, la Comisión de Recursos Hídricos de la Cámara de Diputados, luego de un largo debate y de tres paquetes de indicaciones ingresados por el Ejecutivo y múltiples indicaciones parlamentarias, terminó de votar en general y en particular el proyecto de ley, pasando a la Comisión de Agricultura, la que lo despachó el 21 de junio de 2016, pasando luego a la Comisión de Hacienda, donde se votó el 13 de octubre de 2016. Finalmente, la Sala de la Cámara de Diputados lo aprobó en general y en particular el 22 de noviembre de 2016, remitiéndolo al Senado, en segundo trámite constitucional.

La Sala del Senado determinó que este proyecto de reforma al Código de Aguas sería revisado y votado por las comisiones de Recursos Hídricos, la de Agricultura y la de Constitución. En la Comisión de Recursos Hídricos, Desertificación y Sequía, el proyecto recibió nuevas indicaciones y, finalmente, fue sancionado en general y en particular, con modificaciones, el 18 de abril de 2017, pasando a la Comisión de Agricultura. El nuevo Gobierno no priorizó este debate, quitándole urgencia legislativa hasta la actualidad, sin embargo, en enero de 2019 la nueva autoridad ingresó una indicación sustitutiva que proponía un nuevo proyecto de ley, reemplazando todo lo obrado con anterioridad.

La propuesta del Ejecutivo fue rechazada íntegramente por la Comisión de Agricultura, reponiendo el proyecto original y aditando nuevas indicaciones votadas por unanimidad. Esta Comisión despachó la iniciativa en marzo de 2020, pasando a la Comisión de Constitución, la cual lo discutió y enmendó, desde la perspectiva de su constitucionalidad, despachándolo el 2 de julio de 2021. La Sala del Senado aprobó el día 27 de julio de 2021, por unanimidad, la idea de legislar (votación en general), dando 24 horas al Ejecutivo para presentar nuevas indicaciones, las que se votaron el 28 de julio de 2021 por la Comisión de Recursos Hídricos en una sesión de 16 horas.

Finalmente, la Sala del Senado lo despachó en todas sus partes el 4 de agosto de 2021, agregando múltiples modificaciones al proyecto despachado por

la Cámara de Diputados. Por esta razón, el proyecto volvió a la Cámara de origen, la cual, el 7 de septiembre de 2021, rechazó 16 de las 130 disposiciones que el Senado proponía agregar, suprimir o modificar. Dichas disposiciones pasaron a una Comisión Mixta de cinco diputados y cinco senadores para que discutan, editen y propongan a ambas cámaras un texto definitivo. A la fecha de este escrito se encuentra en votación, aunque con bastante consenso.

Los contenidos principales del proyecto de ley efectivamente van en la dirección de reducir, sustantivamente, la brecha regulatoria que impide una apropiada gobernanza del agua, siendo sus ejes principales los siguientes:

- Naturaleza de las Aguas. Se propone en el artículo 5° que “Las aguas, en cualquiera de sus estados, son bienes nacionales de uso público. En consecuencia, su dominio y uso pertenece a todos los habitantes de la nación.” En consecuencia, el ámbito de protección incluye al vapor de agua, aprovechable para la geotermia y a glaciares y otros cuerpos de agua en ambientes criogenizados, recogiendo, además, la norma del Código Civil de que pertenecen a la sociedad toda, siendo, por tanto, inajenables.
- Naturaleza de los derechos de aguas. Se establece en el artículo 6° que el derecho consiste en el uso y goce temporal de las aguas, de conformidad con las reglas, requisitos y limitaciones que prescribe ese Código y que se origina en virtud de una concesión, o por el solo ministerio de la ley. Otras disposiciones del mismo cuerpo legal explicitan que la ley puede establecer restricciones y limitaciones al ejercicio del derecho y que los usos podrán limitarse o suspenderse para resguardar la sustentabilidad de las fuentes naturales. Los nuevos derechos de aprovechamientos de aguas dejan de ser indefinidos y tanto nuevos como antiguos dejan de ser perpetuos, posibilitándose, en consecuencia, su extinción y caducidad.
- Priorización de las aguas para la función de subsistencia. Se reconoce en el artículo 5° al acceso al agua potable y el saneamiento como un derecho humano esencial e irrenunciable que debe ser garantizado por el Estado. Sorprendentemente, esta garantía no se encuentra ni en la actual Constitución ni en la legislación vigente. En el artículo 5° bis se prioriza el uso para el consumo humano, de

subsistencia y saneamiento, tanto en el otorgamiento como en la limitación al ejercicio de los derechos, como en el caso de los decretos de escasez hídrica. Además, el proyecto de ley contiene varias disposiciones que protegen a las comunidades indígenas. Por ejemplo, en el artículo 5 bis se dispone que: “En el caso de los territorios indígenas, el Estado velará por la integridad entre tierra y agua, y protegerá las aguas existentes para beneficio de las comunidades indígenas, de acuerdo a las leyes y a los tratados internacionales ratificados por Chile y que se encuentren vigentes.”

Se aprueban varias disposiciones que buscan asegurar el ejercicio de este derecho humano, facultándose al Estado para constituir reservas de aguas y denegar solicitudes de Derechos (Arts. 5ter y 147 bis) para este propósito y para preservar la función ecosistémica del agua. Se faculta a la DGA para autorizar a los comités de Agua Potable Rural (APR) extraer agua mientras estén tramitando sus concesiones, hasta por 12 litros por segundo. Se agrega que cualquier APR podrá cavar en suelo propio o en el de cualquiera de sus integrantes o en terrenos fiscales, pozos para consumo humano y usos domésticos, sin necesidad de tramitar un derecho de aprovechamiento. Y se agrega que el Presidente de la República, para garantizar la función de subsistencia, podrá constituir derechos de aguas, aunque no exista disponibilidad (Art. 147 quáter). Este concepto de disponibilidad es jurídico y equivale la resta de la disponibilidad hídrica (oferta), de todos los caudales concedidos como derechos de aprovechamiento, más el caudal ecológico mínimo. En consecuencia, excepcionalmente, y en virtud de la primacía del derecho humano de acceso universal a agua potable, saneamiento e higiene, se autoriza a sobre otorgar derechos, debiéndose, por tanto, prorratear el agua existente, entre todos los demás usuarios.

Se prohíbe exploraciones y extracciones de aguas en glaciares (artículo 5 inc. 5), en áreas declaradas bajo protección oficial de la biodiversidad (artículo 129 bis 2), en aguas subterráneas que alimentan vegas, bofedales y pajonales de la macrozona norte (artículos 58 y 63), en terrenos que correspondan a sectores acuíferos que alimenten humedales que hayan sido declarados por el Ministerio del Medio Ambiente, como ecosistemas amenazados, degradados o como sitios prioritarios, en humedales urbanos (artículo 63) o en zonas de turberas en la macro zona austral (artículo 47, inciso 2). Además, se permite aplicar retroactivamente el caudal ecológico

mínimo a derechos pre existentes en parques nacionales, reservas nacionales, reservas de región virgen, monumentos naturales, santuarios de la naturaleza, humedales de importancia internacional y los sitios prioritarios de primera prioridad; y se crea el derecho de aprovechamiento “in situ” o aprovechamiento sin extracción de las aguas, tanto para fines de conservación ambiental, como para el desarrollo de proyectos de turismo sustentable.

5.- Por último, se fomenta la gestión eficiente de las aguas, no solo en la explotación del recurso, sino también en el cuidado del ciclo hidrológico y de los ecosistemas que interactúan con el agua. Se establecen duras sanciones (extinción) frente a la tenencia ociosa y especulativa de derechos que no se aprovechan. Se duplica incrementalmente (cada cinco años) el monto de la sanción de pago de patentes por no aprovechamiento de las aguas y se dispone que todos los derechos deberán inscribirse so pena de caducidad. Se crea un Fondo para la Investigación, Innovación y Educación en Recursos Hídricos y se regula los Planes Estratégicos de Recursos Hídricos en cuencas, para propiciar la seguridad hídrica frente al Cambio Climático. Estos planes deberán considerar a lo menos con:

- a. Una modelación hidrológica e hidrogeológica de la cuenca.
- b. Un balance hídrico.
- c. Un plan de recuperación de acuíferos.
- d. Un plan para hacer frente a las necesidades futuras de recursos hídricos, especialmente para el consumo humano.
- e. Iniciativas de evaluación de posibilidades por cuencas, a fin de innovar con fuentes alternas para el aprovechamiento y reutilización de aguas, con énfasis en soluciones basadas en la naturaleza.

## 5. CONCLUSIONES

Resulta más común que lo esperado, que algunas organizaciones de usuarios de aguas y sus gremios, respondan a la incertidumbre hídrica demandado al Estado un activo plan de inversiones en infraestructura hídrica de acumulación y de reducción de pérdidas, como las que ocurren en la conducción de aguas por evaporación o por percolación, al igual que un aumento de los fondos concursables para proyectos de eficiencia hídrica intra prediales, como

los de riego por goteo. Para estos actores, muchas veces, las iniciativas de adecuación legal son innecesarias, en el mejor de los casos, o las perciben como una amenaza, ya que justamente no se trata de actores carenciados en materia de agua.

En el caso de los proyectos de ley revisados, la resistencia provino principalmente desde el principal gremio agrícola, la Sociedad Nacional de Agricultura y uno de sus organismos asociados, la Asociación de Canalistas de Chile. El propósito de esta resistencia al cambio no era discutir o adecuar algunas disposiciones, sino lograr que no se legislara. Algunos de sus representantes negaron, ante las comisiones legislativas, los fenómenos incrementales de escasez hídrica que grandes territorios han experimentado en la última década. Sin embargo, también hubo otros sectores del mundo agrícola, más propensos al cambio, especialmente la Asociación de

Exportadores de Frutas (ASOEX) y, por cierto, otros gremios de la producción.

Esa negación, junto con el hecho de que el país experimenta una denominada mega sequía, si bien dilató el proceso, finalmente hizo que, por reacción, se ampliara el consenso. De hecho, la reforma al Código de Aguas sancionada por el Senado en julio de 2021, fue aprobada en general, por la unanimidad de sus integrantes.

Contar con un marco regulatorio acorde con los signos de los tiempos y una institucionalidad de aguas con capacidad de planificar e implementar dichos planes, va a permitir subir otro peldaño en la escala de las brechas de la gobernanza de los recursos hídricos, posibilitando que el foco de la acción pública se pueda centrar en otras brechas, como la de información o la de capacidades.

## REFERENCIAS

- BANCO MUNDIAL (2011). CHILE, Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Documento del Banco Mundial, Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe, 31 de marzo de 2011.
- BANCO MUNDIAL (2013). Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua. Banco Mundial, 28 de junio de 2013
- BANCO MUNDIAL (2014). Plan para la Mejora del Marco Institucional del Agua en Chile: Etapa 2 - Propuesta de creación de una Subsecretaría de Recursos Hídricos. Unidad de Medio Ambiente y Agua, Departamento de Desarrollo Sostenible de América Latina y el Caribe. Documento del Banco Mundial, 5 de junio de 2014. Ver <https://documents1.worldbank.org/curated/en/110381600098813959/pdf/Etapa-2-Propuesta-de-Creacion-de-Una-Subsecretaria-de-Recursos-Hidricos.pdf>
- BID (2020). Indicadores de Gobernanza Ambiental para América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo y World Justice Project (2020). Visitado en septiembre de 2021. Ver <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Indicadores-de-gobernanza-ambiental-para-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- CEPAL (2010). La hora de la igualdad: brechas por cerrar, caminos por abrir. (LC/G.2432(SES.33/3)). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago, 2010.
- CEPAL 2012. Los países de renta media: Un nuevo enfoque basado en brechas estructurales (LC/G.2532/ Rev.1). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago, 2012
- CEPAL, 2016. El enfoque de brechas estructurales. Análisis del caso de Costa Rica. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago, noviembre de 2016. Ver [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40805/1/S1600998\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40805/1/S1600998_es.pdf)
- CEPAL-OECD, 2016. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), Evaluaciones del Desempeño Ambiental: Chile 2016, Santiago, 2016.
- Domínguez, Judith. Progresos en materia de gobernanza del agua en México y el reto de la adaptación en zonas urbanas. En Anuario de Espacios Urbanos, N° 13, p. 273, año 2006. Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, 2006.

- Dourojeanni, Axel. Políticas Hídricas y Leyes de Agua, en *Desafíos del Agua para la región Latinoamericana*, Fundación CHILE, Santiago, 2016, pp. 44-59.
- Estévez (2017). Estévez, Carlos, Director General de Aguas. Presentación ante la Comisión de Agricultura del Senado de la República 4 de septiembre de 2017. En *Informe de la Comisión de Agricultura, recaído en el proyecto de ley, en segundo trámite constitucional, que reforma el Código de Aguas (Boletín N° 7.543-12)*, pp. 43-53. [https://senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php? Boletín 7543-12/Informe/27-03-2020](https://senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?Boletín_7543-12/Informe/27-03-2020)
- Estévez Carlos; Herrera, Patricia; y Tiribocchi, Alessandra. (2019). *Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Implementación de políticas públicas en América Latina y el Caribe*. PHI-VIII/Documento técnico N°40. UNESCO y CODIA, 2019. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000370289.locale=en>
- FCH (2019). *Escenarios Hídricos 2030-EH2030 (2019). Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile*. Fundación Chile. Santiago de Chile.
- Lipsey, Richard y LANCASTER, Kelvin (1956) *The General Theory of the Second Best* en *Review of Economic Studies* (1956)
- Jaspers, Frank G. W., (2003). *Institutional Arrangements for Integrated River Basin Management*.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. *Actas de la Mesa Nacional del Agua*. En <https://www.mop.cl/MesaAgua/docs/>
- OECD (2011), *Water Governance in OECD Countries: A Multi-level Approach*, OECD Studies on Water, OECD Publishing; <http://dx.doi.org/10.1787/9789264119284-en>
- OECD (2012), *Water Governance in Latin America and the Caribbean: A Multi-Level Approach*, OECD Studies on Water, OECD Publishing; <http://dx.doi.org/10.1787/9789264174542-en>
- OECD (2015), *Principios de Gobernanza del Agua de la OCDE*, [www.oecd.org/governance/oecd-principles-on-water-governance.htm](http://www.oecd.org/governance/oecd-principles-on-water-governance.htm)
- ONU (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible: 17 objetivos para transformar nuestro mundo*. Organización de Naciones Unidas, 2015.
- UNESCO (2012). *Seguridad hídrica – Respuesta a los desafíos locales, regionales y mundiales*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Programa Hidrológico Internacional, Octava Fase, Plan Estratégico 2014-2021.
- WWAP-UNESCO (2006). *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. El agua, una responsabilidad compartida. 2° Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. UN-WATER/WWAP/marzo de 2006.
- WWAP-UNESCO (2015). *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. Agua para un Mundo Sostenible, Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015, Resumen Ejecutivo*.
- WWAP-UNESCO (2019). *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. París, UNESCO.



## Plantaciones forestales, bosque nativo, y su efecto en la producción de agua en micro-cuencas del centro sur de Chile

*Forest plantations, native forest, and its effect on water production in micro-basins of south central Chile*

Oscar Hernández Acuña <sup>1\*</sup>

Recibido: 29/09/2021

Aceptado: 02/10/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

En este estudio se compararon variables hidrológicas de dos cuencas con distinta cobertura forestal, para determinar si esta cobertura diferencial incide en la producción de agua a nivel de escorrentía. La cuenca El Durazno, ubicada en la precordillera andina, posee una precipitación anual de 1520 mm y vegetación nativa. Por otra parte, la cuenca El Guanaco se encuentra en la cordillera costera; posee una precipitación anual de 788 mm y contiene plantaciones forestales de especies exóticas. Ambas cuencas pertenecen a la Región de Ñuble. Se usó información pluviométrica, fluviométrica y además topográfica, para estimar indicadores morfométricos. Las variables hidrológicas fueron las precipitaciones, caudal promedio, caudal punta, caudal específico, volumen de agua superficial y subterráneo. Estas fueron comparadas con pruebas estadísticas no paramétricas a escala anual, mensual y diaria. El único indicador morfométrico que mostró diferencias fue la altura media, favoreciendo a la cuenca andina. En variables hidrológicas, las pruebas indicaron que la precipitación de los últimos 30 años, la precipitación diaria y el caudal específico de los meses lluviosos, mostraron diferencias significativas. Sin embargo, las precipitaciones y escorrentías mensuales estudiadas, no presentaron diferencias significativas. Finalmente, El Durazno cubierto con bosque nativo y con precipitaciones superiores en 82%, mostró un caudal específico menor que El Guanaco, cubierto con plantaciones forestales. Esto señala que dicha producción de agua no depende linealmente de las lluvias y que existen otros factores como los hidrogeológicos, que explicarían estos comportamientos, los que no son atribuibles solo a las lluvias o a la cobertura vegetal presente.

**Palabras clave:** Plantaciones, bosque nativo, hidrología, cuencas, caudales, producción de agua.

### Abstract

*In this study, hydrological variables of two basins with different forest cover were compared to determine if this differential cover affects the production of water at the level of runoff. The El Durazno basin, located in the Andean foothills, has an annual rainfall of 1,520 mm and native vegetation. On the other hand, the El Guanaco basin is located in the coastal mountain range; it has an annual rainfall of 788 mm and contains forest plantations of exotic species. Both basins belong to the Ñuble Region. Rainfall, fluviometric and topographic information were used to estimate morphometric indicators. The hydrological variables were rainfall, average flow, peak flow, specific flow, volume of surface and underground water. These were compared with non-parametric statistical tests on an annual, monthly and daily scale. The only morphometric indicator that showed differences was the mean height, favoring the Andean basin. In hydrological variables, the tests indicated that the precipitation of the last 30 years, the daily precipitation and the specific flow of the rainy months, showed significant differences. However, the monthly rainfall and runoff studied did not show significant differences. Finally, El Durazno covered with native forest and with 82% higher rainfall, showed a lower specific flow than El Guanaco, covered with forest plantations. This indicates that said water production does not depend linearly on rainfall and that there are other factors, such as hydrogeological factors, that would explain these behaviors, which are not attributable only to the rains or to the vegetation cover present.*

**Keywords:** Forest plantations, native forest, hidrology, watershed, flow, water production.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El recurso hídrico es fundamental para el desarrollo de todo ser vivo, sin embargo, está siendo afectado tanto por variaciones climáticas, como también, por la sobrepresión por parte de la comunidad, que ha realizado un inadecuado aprovechamiento del recurso. Según un informe realizado por la Universidad de Chile (2010) acerca del estado medioambiental del país, en los últimos años el planeta ha registrado las temperaturas más altas en casi un siglo, provocando una alerta generalizada entre los sectores ambientalistas y académico-científicos, quienes consideran que estas temperaturas con el pasar del tiempo, podrían incrementarse, dando lugar a diversos impactos en el medio ambiente, principalmente en la disponibilidad de los recursos hídricos en el largo plazo. Asimismo, Chile sería particularmente sensible frente a un cambio climático global, puesto que gran parte del país está ubicado en una zona de transición climática. Junto con esta variabilidad climática, según declara la DGA (2014), el aumento de la demanda de agua dulce ha provocado el agotamiento de los derechos superficiales, tornándose cada vez más importante la conservación de los recursos hídricos subterráneos, de forma de intentar garantizar el abastecimiento, tanto de las actividades productivas como del consumo humano. Un componente importante para la conservación de aguas y suelos en las cuencas geográficas tiene que ver con la cobertura vegetal presente en ellas, la cual otorga protección al suelo frente a agentes erosivos. Sin embargo, la sustitución del bosque nativo por plantaciones forestales y la plantación masiva en diversas zonas descubiertas de vegetación, ha generado una sensibilidad por parte de la comunidad, quienes desconocen los efectos que provocaría esta nueva masa boscosa en la disponibilidad hídrica de la cuenca. El establecimiento de las plantaciones forestales ha sido cuestionado por su impacto en los recursos hídricos y el medio ambiente, tanto en el debate público, como también en los medios de comunicación, culpando a las plantaciones de ser causantes del déficit de agua en las zonas rurales, cuestiones que incluso han sido planteadas por miembros del parlamento chileno (González, 2007). Debido a estos antecedentes, surge el interés de cuantificar la relación que existe entre las distintas variables hidrológicas (precipitación, caudal promedio, caudal específico, caudal punta, volúmenes de escorrentía superficial y subterráneo a escala mensual) en diversas unidades hidrográficas.

En este marco, esta investigación apunta a determinar los comportamientos similares o diferenciales que se observan en dos cuencas de la región del Ñuble, sometidas a diferentes climas y estratos vegetacionales, para un mismo periodo de estudio.

## **2. METODOLOGÍA**

### *2.1 Zona de estudio*

La región de Ñuble se localiza cercana al límite sur de la zona central, específicamente entre los 36° y los 37° de latitud sur. Desde el punto de vista climático, la región marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que comienzan a desarrollarse desde el borde sur de la cuenca del Itata, por lo que se podría definir como el último tramo de la región mediterránea de estación seca prolongada del Chile Central. Estas condiciones le confieren un carácter con algunas variaciones extremas según la estación del año (BCN, 2018). Con respecto al uso del suelo y la vegetación, según información de CONAF (2018), la región de Ñuble posee 3,800 km<sup>2</sup> de plantaciones forestales y 2,480 km<sup>2</sup> de bosques nativos. Particularmente, en Quirihue se presenta una superficie de plantaciones forestales que abarca el 62.6% de la comuna, y solo el 6.5% corresponde a bosque nativo. Por el contrario, en San Fabián de Alico un 6.3% de la superficie de la comuna pertenece a plantaciones forestales y un 40.8% contiene bosque nativo. Las cuencas seleccionadas para realizar el análisis fueron El Durazno y El Guanaco. La primera está ubicada en la comuna de San Fabián de Alico, localizada en la precordillera Andina, específicamente en las coordenadas 36°27'3.5'' S, 71°32'32.85'' W. La segunda cuenca, El Guanaco, está ubicada en la comuna de Quirihue, cordillera de la costa, específicamente en las coordenadas 36°12'3.5'' S, 72°37'37.58'' W. Ambas cuencas son parte del patrimonio de la empresa Masisa S.A. La información fue registrada durante un periodo que fue desde el 25 de enero del 2013 hasta el 31 de mayo de 2014 para ambas cuencas.

### *2.2 Catastro vegetal*

Un componente de relevancia en la metodología es la definición del uso del suelo de cada cuenca en estudio. Para ello, se investigó la información contenida en el sitio web del Ministerio de Bienes Nacionales, denominado Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE, 2016) y que corresponde al

catastro de uso de suelo y vegetal, cuya institución responsable fue la Corporación Nacional Forestal. Este catastro se presenta en archivos vectoriales representando el medio físico mediante una serie de polígonos.

### 2.3 Morfometría de cuencas

Para llevar a cabo la caracterización morfométrica de las cuencas, fue necesario contar con información geográfica de la zona de estudio, principalmente información de la topografía, representada mediante un modelo digital de elevación, el cual fue obtenido de la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile IDE (2016), cuya institución responsable fue el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Este modelo digital de elevación corresponde a Alos Palsar cuya resolución es de 12.5 metros, con lo cual se pudieron construir curvas de nivel cada 25 metros. Como detallan Zamfir y Simulescu (2011), los modelos digitales de elevación permiten realizar análisis relacionados con una serie de procesos hidrológicos, como zonas de inundación, red de flujo, erosión, etc. Así también, los autores indican cómo realizar una delimitación automática de cuencas utilizando softwares de dominio público y cerrado.

$$K_c = 0.28 P/\sqrt{A} \quad (1)$$

Donde

P es el perímetro de la cuenca en metros  
A es el área de la cuenca en m<sup>2</sup>

b) Pendiente media simple (Pm). La Pendiente Media Simple se calcula identificando cada curva de nivel presente en la cuenca, determinando su longitud y la

### 2.4 Indicadores de forma y relieve

Con la información topográfica contenida en el modelo digital de elevación, fue posible llevar a cabo la caracterización del área de estudio mediante la aplicación de distintos indicadores que definen la morfometría de cuencas hidrográficas, detallados por Pizarro y Novoa (1986). Estos son definidos específicamente en términos cuantitativos y a partir de ecuaciones matemáticas, las que se mencionan a continuación.

a) Coeficiente de compacidad (Kc). Este índice fue creado por Gravelius en 1914. Está definido por el cociente entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo con la misma superficie de la cuenca. Permite conocer a qué figura geométrica de naturaleza circular se asemeja la cuenca hidrográfica. Por lo tanto, conociendo el perímetro y área de la cuenca, se puede deducir si la cuenca es de carácter oblonga, ovalada o redonda. Mientras más alejado del valor uno, el coeficiente define una mayor irregularidad, con respecto a un círculo. La expresión matemática definida es la siguiente:

superficie que ocupa dentro de la cuenca. Con esta información fue posible calcular la Pendiente Media mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$P_m = D \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{A} \quad (2)$$

Donde

D es la diferencia entre cada curva de nivel (en metros)  
li es la longitud de la curva de nivel i (en metros)  
A es el área de la cuenca en m<sup>2</sup>

c) Curva hipsométrica. Otra forma de describir el relieve de una cuenca es la curva hipsométrica. Esta curva establece una relación entre las distintas curvas de nivel de la cuenca y la superficie acumulada que cada una de ellas sostiene. Ello, considerando que, en la cota de altitud mínima de la cuenca, está contenido el 100% de la superficie. Asimismo, la cota máxima de la cuenca detendrá un 0% de la superficie, sobre

ese nivel de altura. Llamas (1993) señala que la curva hipsométrica es un reflejo del estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca. Este nivel de equilibrio se representa en la figura 1, donde la curva A indica una cuenca con gran potencial erosivo por su forma de meseta. La curva B representa una etapa de equilibrio, geológicamente madura y, por último, la curva C refleja una cuenca de valle o erosionada.

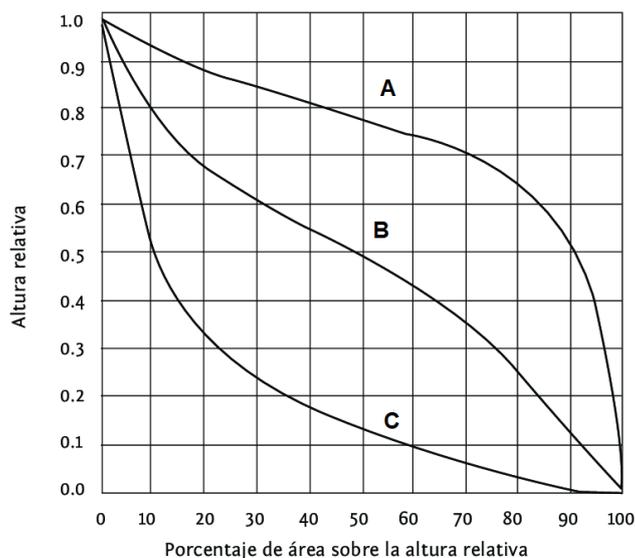


Figura 1. Características de la curva hipsométrica. Fuente: Campos (1992)

d) **Altura media (Hm).** La altura media relaciona el volumen del relieve (definido por la curva hipsométrica) y la superficie de la cuenca. Para determinar el volumen de relieve, se tuvo que calcular el área bajo la curva hipsométrica. Sin

embargo, Pizarro y Novoa (1986) advierte que este índice de relieve posee un sesgo, ya que pueden existir tres cuencas disímiles que entreguen una altura media similar. Está definida por la siguiente ecuación:

$$Hm = \frac{\text{Volumen del relieve}}{\text{Superficie de la cuenca}} \quad (3)$$

e) **Coefficiente orográfico (Co).** El coeficiente orográfico se define como el producto de la altura media por la tangente del ángulo que define la altura media, dividida por la superficie. Esto define que su expresión sea igual a la altura media al cuadrado

dividido por la superficie. Pizarro y Novoa (1986) indica que valores bajo 25 denotan cuencas gastadas, y sobre este valor, representa cuencas recientes o bien, con caracteres de erodabilidad bajos. La expresión analítica es la siguiente:

$$Co = \frac{Hm^2}{\text{Superficie de la cuenca}} \quad (4)$$

### 2.5 Parámetros de la red de drenaje

El modelo digital de elevación es esencial para estimar los parámetros hidrológicos, como la dirección del flujo, la acumulación del flujo, las redes de corrientes, la longitud del flujo más larga y la delineación de la cuenca (Ezz et al., 2019). El cálculo de los parámetros de la red de drenaje se llevó a cabo mediante técnicas proporcionadas por ArcGIS 10.5. Estas se encuentran en la sección Análisis espacial y

sus herramientas: Superficie, Hidrología, Cuenca (Zamfir y Simulescu, 2011). Una vez que se trazaron los cursos de agua y se representaron mediante archivos vectoriales, se procedió a calcular las longitudes de todos los cursos de agua presentes en el área de estudio, considerando cursos de agua permanentes y también temporales. Con esta información fue posible llevar a cabo la caracterización de la red de drenaje del área de estudio, mediante la aplicación de distintos

parámetros; estos son definidos en términos cuantitativos a partir de ecuaciones matemáticas, que se expresan a continuación.

a) Densidad de drenaje (Dd). Este parámetro fue descrito por Horton (1932), el cual relaciona las longitudes de todos los afluentes presentes en la

cuenca, con su superficie. Su expresión determina en promedio cuantos kilómetros de cursos de agua drenan un kilómetro cuadrado de la superficie de la cuenca hidrográfica. La expresión matemática que define el indicador es la siguiente:

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{A} \quad (5)$$

Donde

$l_i$  es la longitud del cauce  $i$ , incluido el principal (en km)

$A$  es el área de la cuenca en (km<sup>2</sup>)

b) Tiempo de concentración ( $t_c$ ). Este indicador permitió estimar lo que teóricamente demora una gota en recorrer desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de la misma, aguas abajo. El método escogido para determinar esta variable

correspondió al parámetro de Giandotti (1934), el cual se aplica para cuencas pequeñas y con pendientes accidentadas (Pizarro, 1993). La expresión matemática es la siguiente:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8\sqrt{H}} \quad (6)$$

Donde

$A$  es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$L$  es la longitud del cauce principal (km)

$H$  es la altura media de la cuenca descontando la cota de origen (m)

c) Perfil longitudinal. Este parámetro representa la trayectoria longitudinal que presenta el curso de agua principal. En el gráfico generado, se puede observar a qué altitud el cauce presentó zonas con pendientes pronunciadas, o zonas de depositación de cuerpos de agua, producto de la presencia de pendientes más suaves.

caídas en las últimas décadas, en estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA, 2019). Este hecho permitió contrastar en un tiempo mucho mayor (27 años), el comportamiento pluviométrico de las dos cuencas de estudio. Para ello, se localizaron las estaciones meteorológicas que se encontraran más cercanas a las cuencas en estudio. Estas estaciones fueron Mangarral, ubicada en la comuna de Quirihue, y San Fabián, localizada en la comuna homónima. La información pluviométrica correspondió a la cantidad de precipitaciones caída en cada año, expresada en milímetros.

## 2.2 Información pluviométrica

Para realizar el estudio del comportamiento y régimen pluviométrico de ambas cuencas hidrográficas durante el periodo de estudio, se debió recopilar información pluviométrica. La información fue obtenida desde estaciones de la empresa Masisa S.A., por parte del personal de ingeniería hidrológica del Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca (CTHA). Las estaciones pluviométricas correspondieron a la Estación Los Coigües en la cuenca El Durazno, y la Estación San Agustín de Puñual en la cuenca El Guanaco. La información obtenida fueron los datos de precipitación diaria para ambas estaciones, expresados en milímetros. Complementariamente a este análisis pluviométrico, se decidió recopilar la información histórica acerca de las precipitaciones

## 2.3 Información fluviométrica

La información fluviométrica fue entregada por personal de CTHA, que previamente la capturó de las estaciones fluviométricas que la empresa Masisa S.A. posee en ambas cuencas. Este registro proviene de un limnógrafo, el cual midió la altura del cauce en función del tiempo, cada quince minutos. Luego y mediante curvas de descarga, se estimó un caudal según la altura determinada de la sección del cauce. La curva de descarga es el resultado de una serie de aforos que se realizaron durante un periodo de

tiempo, creando con ellos una relación del caudal y el nivel del agua en un tramo determinado de un cauce o río. Las estaciones fluviométricas se ubican en el punto de desagüe de ambas cuencas. El caudal de la sección se midió en metros cúbicos por segundo. Con esta información fue posible estimar las siguientes variables; caudal promedio mensual, caudal específico medio mensual, caudal punta específico del mes y volúmenes de caudales específicos superficiales y recesivos. Con la información fluviométrica original, fue posible obtener los caudales máximos y mínimos diarios para cada mes del periodo de estudio, contando así con 16 datos, correspondientes a los meses del periodo de estudio. Para calcular el caudal específico, fue necesario dividir el caudal promedio del mes, por la superficie de drenaje de cada cuenca hidrográfica correspondiente. Esta variable se empleó con el objetivo de considerar la superficie de cada cuenca en la comparación de caudales promedio mensuales y permite definir la productividad de agua de la cuenca por unidad de superficie. Por otra parte, los volúmenes de reserva se definen como el agua almacenada en la cuenca en un determinado tiempo, que para este caso se evaluó en meses. Para estimar estos volúmenes, es necesario identificar los hidrogramas correspondientes (caudal como función del tiempo), y en cada crecida, establecer la separación entre los volúmenes correspondiente a aguas superficiales y aguas subterráneas. Para separar los volúmenes, es necesario identificar el segundo punto de quiebre de la curva de bajada de cada hidrograma, puesto que en este se define el término

de la afluencia de aguas superficiales y el inicio de los caudales recesivos, que provienen exclusivamente de alimentación subterránea (Pizarro, 1993). La estimación de las reservas de agua de la cuenca, es posible realizarla contando con una función matemática que permita modelar el comportamiento de los caudales recesivos, en donde  $Q = Q(t)$ . La función  $Q(t)$  es decreciente, derivado que los caudales recesivos en el tiempo deben ir disminuyendo. Si se cuenta con la función, es posible integrarla entre el tiempo cero (tiempo en el cual se inicia la escorrentía exclusiva de tipo recesiva) y el tiempo infinito (se asume que no hay nuevas aportaciones de agua a la cuenca en el tiempo y por tanto la cuenca terminará por vaciarse en el infinito). El área bajo la curva corresponderá al volumen recesivo remanente, después de cada crecida. Esta estimación corresponde a una por defecto o que subestima, derivado que solo se están considerando las aguas que fluyen por el punto de desagüe de la cuenca y no se consideran volúmenes de aguas subterráneas correspondientes a evapotranspiración, salidas al mar o salidas hacia cuencas cercanas. Para realizar el ajuste de la curva recesiva fue necesario recurrir al modelo matemático planteado por Remenieras (1971), que es una curva de naturaleza exponencial negativa que representa el comportamiento del caudal subterráneo en función del tiempo a partir de los parámetros; caudal inicial ( $Q_0$ ), coeficiente de agotamiento ( $a$ ), número de Euler ( $e$ ), y el tiempo ( $t_0$ ) como se representa a continuación:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8\sqrt{H}} \quad (7)$$

Cabe señalar que se realizó un ajuste tras cada hidrograma de crecida, teniendo que recalcularse los parámetros en función de dos coordenadas de caudal y tiempos distintos en la curva recesiva del hidrograma. Una corresponde al caudal inicial, la cual coincide con el segundo punto de quiebre mencionado anteriormente, y la otra coordenada correspondió al caudal mínimo obtenido antes de comenzar la siguiente crecida. Una vez obtenidas estas coordenadas, se procedió a calcular el coeficiente de agotamiento ( $a$ ) a través de sistemas de ecuaciones y el posterior despeje algebraico.

## 2.2 Análisis estadístico

El análisis comparativo de la información hidrológica se realizó en base a parámetros estadísticos básicos (medias, mínimos, máximos), a relaciones gráficas y a la utilización de la prueba U de Mann-Whitney, prueba recomendada para datos no paramétricos. El uso de la prueba estadística U de Mann-Whitney aplicada para muestras independientes, se utilizó con el objetivo de comprobar si existieron diferencias estadísticamente significativas en las variables hidrológicas (precipitación, caudal medio total, caudal específico medio, caudal punta, volumen de escorrentía superficial y volumen de escorrentía subterránea) entre ambas cuencas hidrográficas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Catastro vegetacional

En la Cuenca El Durazno, se comprobó un único sub-uso correspondiente a Bosque Nativo. Este bosque corresponde al tipo forestal Roble-Hualo, con presencia de raulí. En la Cuenca El Guanaco, se apreciaron tres sub-usos; Bosque mixto, Bosque nativo y Plantaciones forestales. El Bosque mixto corresponde a bosque nativo (*Nothofagus obliqua*) y, con plantaciones forestales o especies exóticas asilvestradas, donde predominan el pino y el

eucalipto. Este bosque mixto se encuentra bordeando los cursos de agua y constituye una superficie de 24.7 ha. El bosque nativo presente en esta cuenca se encuentra representado por un pequeño polígono de apenas 5.13 ha y corresponde al tipo forestal esclerófilo con presencia de especies como peumo, boldo y litre. Por último, más de la mitad de la superficie de esta cuenca, está cubiertas por plantaciones forestales, principalmente de pino, abarcando un área de 37.14 ha. Toda esta información se representa en la figura 2.

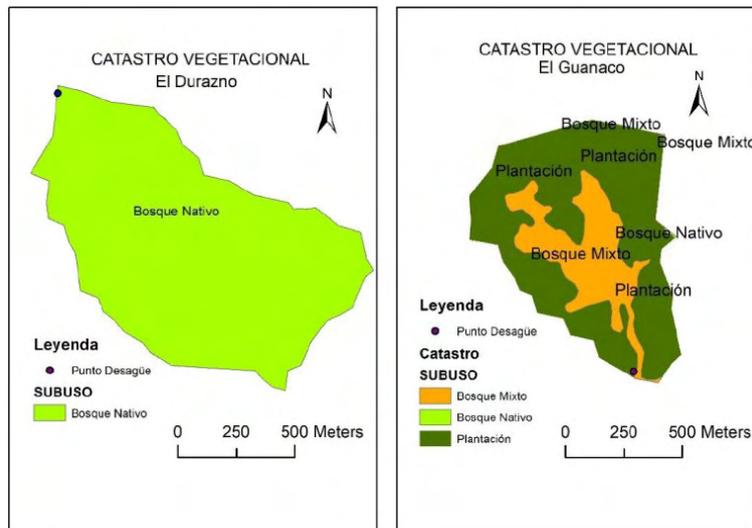


Figura 2. Mapas del catastro vegetacional de las cuencas de estudio

#### 2.2 Indicadores de forma y relieve

El cálculo de superficie en ambas cuencas determinó que El Durazno presenta un área mayor con relación a El Guanaco, donde la primera registró un área de 103.9 ha y la segunda 67.03 ha. Con respecto al Coeficiente de Compacidad, González (2002) indica que si el valor oscila entre 1-1.25 la cuenca tendrá una forma más redondeada; si el valor oscila entre los 1.25-1.5 la cuenca será ovalada, y por último, si el valor supera los 1.5 será oblonga. En este caso, el valor del Coeficiente de Compacidad para ambas cuencas fue menor a 1.25. Con esto, se determinó que ambas unidades son relativamente redondas, sin mayor diferencia entre las cuencas de estudio, según este indicador. En relación con la Pendiente Media, la cuenca El Durazno presenta un mayor valor en comparación con El Guanaco, en donde la primera registró una pendiente de 32% y la segunda de 27%.

En relación con este resultado, se puede inferir que existe una pequeña diferencia porcentual entre ambas unidades. Debido a la ubicación geográfica y a la diferencia longitudinal de ambas cuencas, la Altura media para la cuenca andina fue aproximadamente de 917 msnm, mientras que para la cuenca costera fue menor, con un valor aproximado de 492 msnm. Por otra parte, con respecto al coeficiente orográfico, Pizarro y Novoa (1986) afirma que este coeficiente es uno de los más utilizados y confiables para la definición del relieve. Para el caso de estudio, ambas cuencas presentaron valores mayores a 25%, por lo cual se pudo determinar que ambas son de edad geológica reciente o presentan bajo desgaste. En la figura 3, se pueden apreciar las curvas hipsométricas de ambas cuencas, donde se observó que ambas presentan una curva característica de cuencas de meseta, sin presentar mayores diferencias entre sí.

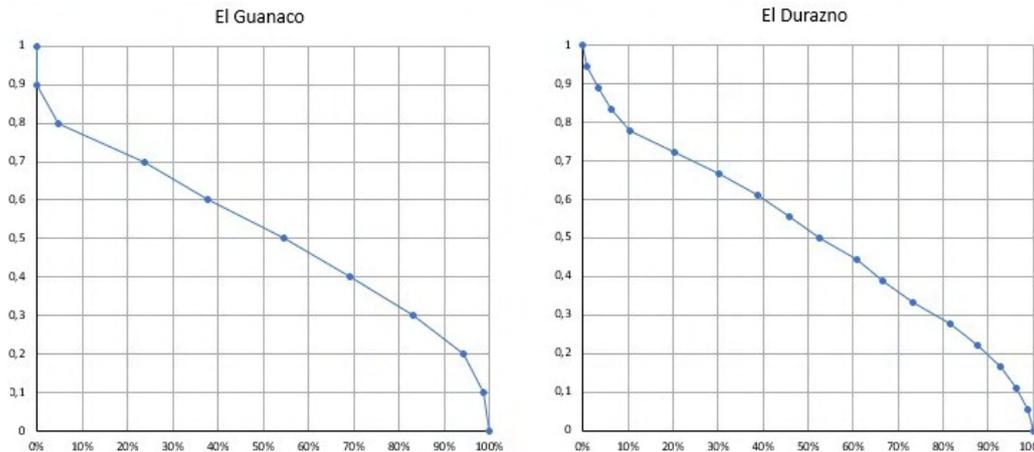


Figura 3. Curvas hipsométricas de ambas cuencas. En el eje vertical se observa la altura en proporciones y en el eje horizontal, la superficie en porcentaje.

### 2.2 Parámetros de la red de drenaje

Con respecto a los resultados obtenidos en los parámetros de la red de drenaje, se pudo apreciar que El Durazno presentó un curso principal de agua más largo y, una mayor presencia de cauces secundarios que El Guanaco. Debido a esto, en la cuenca El Durazno el valor del parámetro densidad de drenaje fue levemente mayor, presentando un valor de 4.3 km/km<sup>2</sup>. Mientras que El Guanaco evidenció una menor presencia de cursos de agua secundarios, obteniendo una densidad de drenaje de 3.9 km/km<sup>2</sup>. Con relación al tiempo de concentración, cuyo valor indica cuánto tarda una gota de agua en trasladarse del punto más alto de la cuenca hacia el punto más bajo de esta, se obtuvo que ambas cuencas

presentaron el mismo valor, correspondiente a 36 minutos. En la figura 4, se expone el perfil longitudinal del cauce principal de ambas cuencas, donde se puede observar que El Guanaco presenta una curva relativamente uniforme. Así también, se observó que el curso de agua comenzó en la cota 600 metros de altitud y desembocó a la altitud de 425 msnm. Por otro lado, en la cuenca El Durazno, el perfil longitudinal se caracteriza por ser más irregular, dando lugar a zonas de acumulación y también a zonas de altas pendientes, representado por una inclinación más pronunciada a la altitud de 875 msnm. Además, la escorrentía en El Durazno comenzó en la cota 1,050 metros de altitud y desembocó a los 700 msnm.

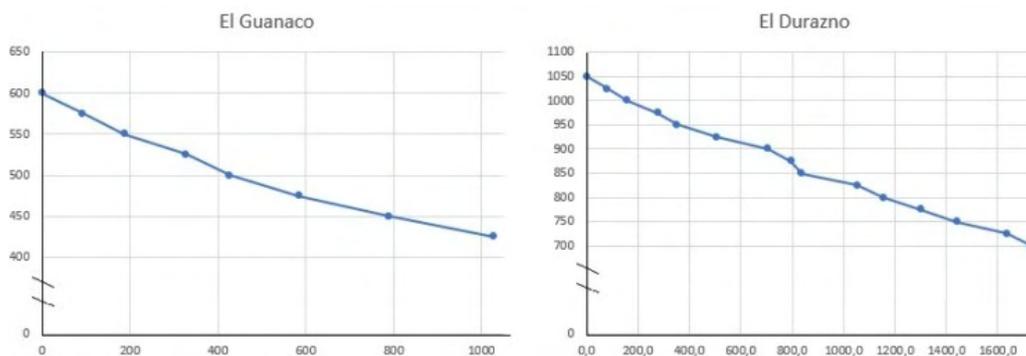


Figura 4. Perfil longitudinal del cauce principal de ambas cuencas. En el eje vertical se muestra la altitud y en el horizontal las longitudes en metros

### 3.4 Resultados pluviométricos

Las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA, 2019) seleccionadas para obtener la información pluviométrica histórica, correspondieron a la estación Mangarral en la comuna de Quirihue, la cual se ubica

en la coordenada 36° 14' 07" latitud Sur y 71° 31' 29" longitud Oeste. Esta estación representa a la cuenca El Guanaco. Asimismo, la estación San Fabián, que representa a la cuenca El Durazno, se encuentra en la comuna del mismo nombre, y se ubica en la coordenada 36° 35' 01" latitud Sur y 71° 31' 29" de

longitud Oeste. La información pluviométrica histórica se resume en la Figura 5, donde se compara la cantidad de precipitaciones caídas en 28 años para la estación San Fabián (1991-2018) y 27 años para la estación Mangarral (1992-2018). Además, se observó

que el régimen pluviométrico fue mayor en la estación de San Fabián, obteniendo una precipitación media anual de 1,520 mm, y de solo 788 mm en la estación de Mangarral, lo que define una diferencia porcentual de un 93%.

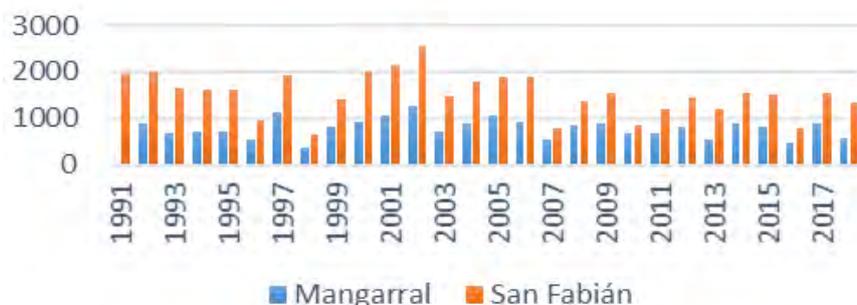


Figura 5. Gráfico comparativo de precipitaciones históricas de la comuna de Quirihue y San Fabián

Por otra parte, según la información pluviométrica obtenida por la empresa Masisa y en el periodo de estudio (2013-2014), se observa que en la cuenca El Guanaco, los valores fueron desde el mínimo de 0 a un máximo de 209.4 mm, con un promedio mensual de 47.8 mm. En contraste, en la cuenca El Durazno se registró un mínimo de 4.3, y un máximo de 335.1 mm, con un promedio mensual de 87,2 mm. El total

de agua caída durante el periodo de estudio en El Guanaco fue de 764.9 mm y en El Durazno fue de 1,395.3 mm. Con estos antecedentes, se puede inferir que esta última cuenca presenta un mayor aporte pluviométrico de un 82% para el periodo en estudio. Estas precipitaciones se representan mensualmente en la figura 6.

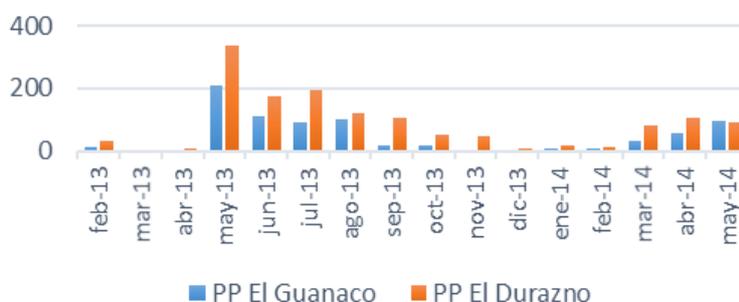


Figura 6. Gráfico comparativo entre las precipitaciones mensuales en milímetros de cada cuenca y, para el periodo de estudio

De la misma manera, fueron comparadas las precipitaciones diarias caídas en los meses lluviosos, específicamente en los meses de mayo, junio, julio y agosto, constituyendo así 152 días para ser comparados. Esto, porque las precipitaciones diarias definen el comportamiento de los caudales en cuencas pequeñas. Este comportamiento está representado en la figura 7, donde se logra apreciar que existieron precipitaciones en los mismos periodos en ambas cuencas; así, la cuenca El Durazno presentó un mayor aporte a nivel diario en los

distintos eventos, llegando a un máximo registrado de 59 mm caídos en un día. Por otra parte, la cuenca El Guanaco mostró un máximo de 52 mm para esta cuenca costera. Esta diferencia se representa de mejor forma en la media aritmética, donde El Durazno presentó un promedio diario de 6 mm y El Guanaco presentó un promedio diario de 4 mm. Además, cabe señalar que en los meses lluviosos (mayo a agosto), y en el periodo de estudio, se registró un 66% de la lluvia caída en la cuenca El Durazno, y un 80% de la lluvia caída en la cuenca El Guanaco.

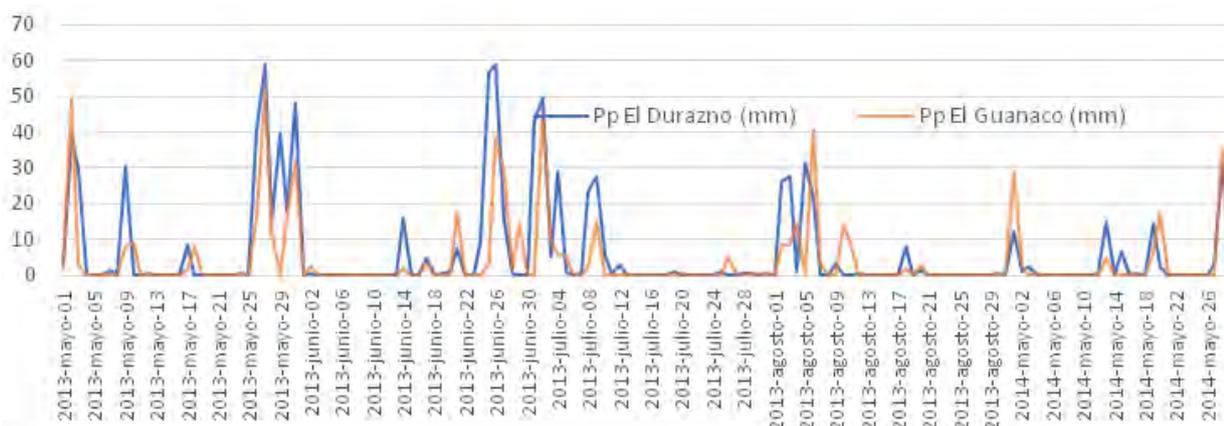


Figura 7. Comparación de precipitaciones diaria de meses lluviosos

### 2.2 Resultados fluviométricos

Las variables obtenidas correspondieron al caudal promedio, caudales punta, caudales específicos y el volumen de escorrentía superficial y subterránea, correspondiente a cada mes del periodo de estudio. En relación con e, en El Guanaco se observaron los mayores registros en los meses de julio y agosto del 2013, en donde el caudal promedio mensual alcanzó valores de 0.023 m<sup>3</sup>/s y 0.022 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Posterior a estas crecidas, el caudal fue disminuyendo paulatinamente llegando a un mínimo de 0.0008 m<sup>3</sup>/s en el mes de marzo del 2014. Asimismo, el promedio del caudal de todos los meses fue de 0.0074 m<sup>3</sup>/s. Por otra parte, en El Durazno se observaron los mayores registros en los meses de mayo y junio del 2013, en donde el caudal promedio mensual alcanzó valores de 0.038 m<sup>3</sup>/s y 0.034 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Tras estas crecidas, el caudal menguó paulatinamente, llegando a un mínimo de 0.0015 m<sup>3</sup>/s en el mes de febrero del 2014. Asimismo, el promedio del caudal de todos los

meses fue de 0.0094 m<sup>3</sup>/s. En comparación, se puede observar que en los meses de mayo y junio de 2013, los caudales fueron mayores para la cuenca El Durazno. Sin embargo, posteriormente en los meses de julio a agosto, El Guanaco registró un mayor caudal promedio que la cuenca en comparación. Además, se puede analizar que ambos caudales comienzan a disminuir desde el mes de septiembre de 2013, hasta el mes de abril de 2014. Todo lo anterior estaría ratificando, en una primera aproximación, el hecho que en la cuenca El Durazno son esperables mayores caudales como producto de una mayor precipitación aportante. No obstante, llama la atención el hecho que las precipitaciones de la cuenca El Durazno superan a la de El Guanaco en un 82% y esa proporción no se mantiene en los caudales que en promedio y en todo el periodo analizado, denotan una superioridad de solo un 24%. El comportamiento del caudal promedio mensual para ambas cuencas puede observarse en la figura 8 expuesta a continuación.

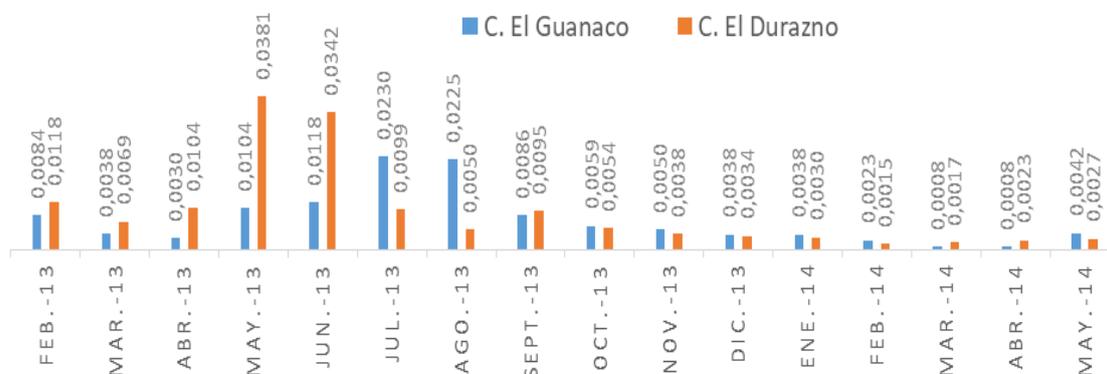


Figura 8. Valores de los caudales promedios mensuales para ambas cuencas en metros cúbicos por segundo

Con respecto al caudal específico, el cual define la producción de agua de la cuenca por unidad de superficie, se observa en la figura 9 que ambas cuencas mantienen la naturaleza observada anteriormente, donde la cuenca El Guanaco registro los mayores valores en los meses de julio y agosto de 2013, con montos de  $0.034 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  y  $0.033 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  respectivamente. Posterior a estas crecidas, el caudal específico disminuyó hasta un mínimo de  $0.0012 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  en el mes de marzo del 2014. Asimismo, el promedio del caudal específico de todos los meses fue de  $0.011 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ . Por otra parte, en la cuenca el Durazno se observaron los mayores registros en los meses de mayo y junio del 2013, con valores de  $0.036 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  y  $0.032 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  respectivamente. Tras estas crecidas, el caudal fue

disminuyendo, llegando a un mínimo de  $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  en el mes de febrero del 2014. Asimismo, el promedio del caudal específico de todos los meses para El Durazno fue de  $0.009 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ . En relación con esta variable en particular, se pudo observar que, al aplicarle una ponderación considerando la superficie de cada cuenca, las diferencias entre ambas unidades disminuyen, lo cual se ve reflejado en el caudal medio mensual específico. Esto, porque El Durazno, que presenta una mayor aportación de precipitaciones en el periodo estudiado (82%), denota caudales promedios específicos muy similares y por bajo los valores de El Guanaco. Este hecho habla de una situación que hay que intentar explicar y que se relaciona con el proceso precipitación-escorrentía.

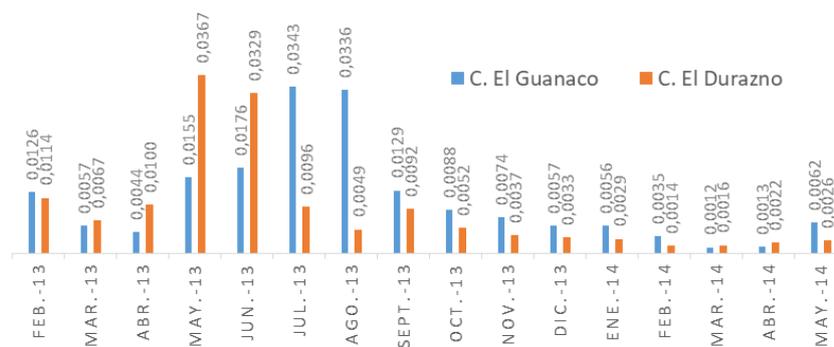


Figura 9. Caudales específicos mensuales para ambas cuencas en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$

Con relación a los caudales punta específicos, se puede señalar que en El Guanaco, se observaron los mayores registros en los meses de julio y agosto del 2013, en donde alcanzó valores de  $0.187 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  y  $0.193 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  respectivamente. Posteriormente a estos meses, los caudales punta específicos fueron disminuyendo llegando a un mínimo de  $0.0028 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  en el mes de abril del 2014. Del mismo modo, el promedio para el caudal punta específico del periodo de estudio fue de  $0.043 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ . En la cuenca El Durazno, el comportamiento del caudal punta específico obtuvo los mayores registros en los meses de mayo y junio del 2013, en donde el caudal punta específico alcanzó valores de  $0.137 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  y  $0.152 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  respectivamente. Luego de estos meses, los caudales punta específicos fueron decreciendo, encontrando un mínimo de  $0.0019 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  ocurrido en el mes de febrero del 2014. Por último, el promedio del caudal punta específico del periodo de estudio resultó ser de  $0.029 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ . En base a lo anteriormente mencionado, se puede extraer que en la cuenca El Guanaco, el promedio de caudal

punta específico en el periodo de estudio fue mayor en comparación a la cuenca El Durazno, superándolo en un 48%. El comportamiento de esta variable se ilustró en la figura 10, la cual se expone a continuación. Con respecto a los caudales específicos medios diarios de los meses lluviosos (mayo a agosto), se logra observar en la figura 11 que los valores fluviométricos pertenecientes a El Guanaco muestran valores superiores a los de la cuenca El Durazno. Así, la primera cuenca obtuvo un máximo de  $0.19 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  y la segunda un valor de  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ . Esto determina que la producción media diaria, por unidad de superficie y en los meses lluviosos, es mayor en una cuenca con menor superficie, menores precipitaciones y cobertura de plantaciones exóticas. De la misma forma, el caudal medio específico mensual, para los meses lluviosos, define una situación similar. Así, el promedio de caudal específico de meses lluviosos para El Guanaco alcanzó los  $0.021 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , en tanto que para El Durazno el valor fue de  $0.017 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ .

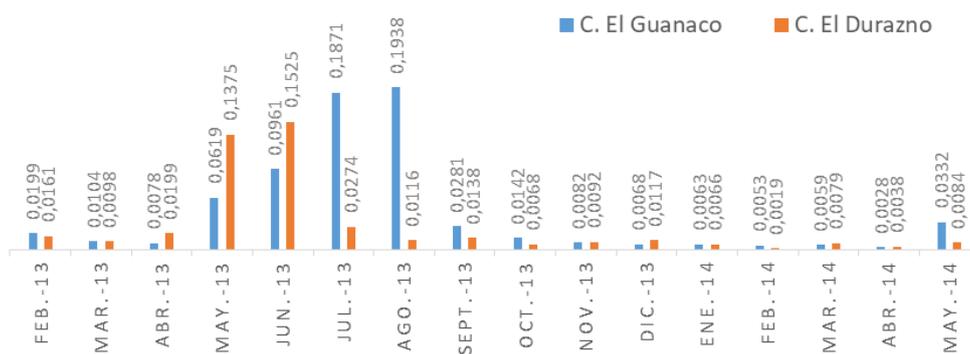


Figura 10. Caudales puntas específicos mensuales para ambas cuencas en m³/s/km²

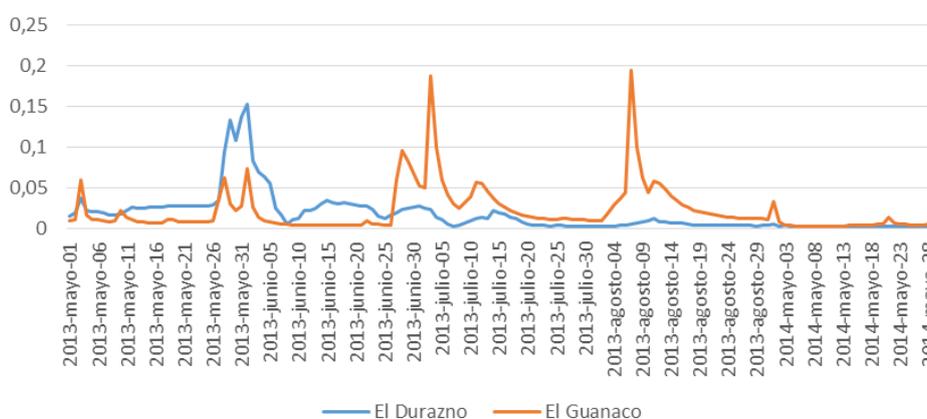


Figura 11. Comparación de caudales específicos diarios de meses lluviosos en m³/s/km²

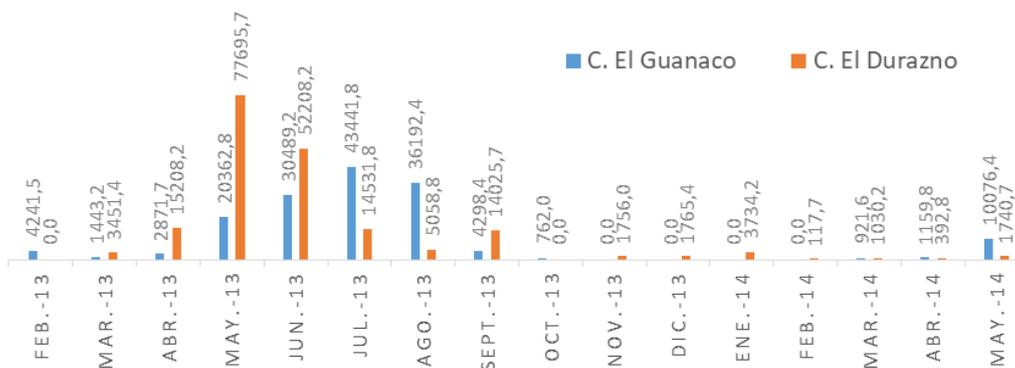


Figura 12. Volúmenes de escorrentías superficiales mensuales en m³/km²

Los volúmenes de escorrentía se separaron en dos partes, la superficial y la subterránea. Con respecto al volumen de escorrentía superficial, en El Guanaco se observa que los mayores aportes superficiales correspondieron a los valores de 43,441 m³/km² y 36,192 m³/km², los cuales ocurrieron en los meses de julio y agosto, coincidiendo así, con los meses en lo

que se obtuvo un mayor caudal total. Así también, se observa que el volumen de caudal superficial fue nulo en los meses de noviembre y diciembre de 2013, junto con enero y febrero de 2014, presentándose para estos meses, caudales de origen netamente recesivos. Por último, se obtuvo que el promedio para esta variable fue de 9,766 m³/km² durante el periodo

de estudio. En El Durazno, los mayores valores corresponden a  $77,695 \text{ m}^3/\text{km}^2$  y  $52,208 \text{ m}^3/\text{km}^2$ , registrados en los meses de mayo y junio, meses en los que esa cuenca presentó un mayor caudal total y, por otra parte, se observa que el volumen de caudal superficial específico estuvo ausente en el mes de octubre, dando origen a caudales recesivos. Junto con esto, se obtuvo un promedio de volumen superficial específico de  $12,045 \text{ m}^3/\text{km}^2$ . En base a estos antecedentes, se puede inferir que El Durazno presentó un promedio 23% mayor que El Guanaco. En la misma línea, el total de volumen superficial durante el periodo de estudio fue mayor en la cuenca El Durazno, obteniendo un valor de  $0.2 \text{ Hm}^3/\text{km}^2$ , en comparación con El Guanaco que obtuvo un valor de  $0.16 \text{ Hm}^3/\text{km}^2$ . Esta diferencia en el total del volumen de caudal superficial específico, representa que la cuenca El Durazno presentó una diferencia del 25% con respecto a la cuenca El Guanaco durante el periodo de estudio. El comportamiento de los volúmenes superficiales específicos se representa en la figura 12 expuesta a continuación. En relación con los caudales subterráneos específicos, se logra apreciar que los valores se distribuyen de manera disímil con respecto a la variable mencionada anteriormente. De esta forma, se logra apreciar que para El Guanaco, el máximo volumen se obtuvo en el

mes de octubre, alcanzando  $65,612 \text{ m}^3/\text{km}^2$ , y por su parte, el valor más bajo fue de  $2,575 \text{ m}^3/\text{km}^2$  ocurrido en el mes de febrero de 2014. Por último, el promedio de volumen de caudal subterráneo específico durante el periodo de estudio fue de  $19,232 \text{ m}^3/\text{km}^2$ . Posteriormente, para la cuenca El Durazno se observa que el mayor volumen de caudal subterráneo específico correspondió a  $28,407 \text{ m}^3/\text{km}^2$  ocurrido en el mes de septiembre, y por otra parte, el mínimo de volumen subterráneo para esta cuenca fue de  $1,084 \text{ m}^3/\text{km}^2$  que se produjo en el mes de abril de 2013. Paralelamente, el promedio de volumen de caudal subterráneo específico fue de  $7,894 \text{ m}^3/\text{km}^2$  considerando los meses estudiados. En base a lo anteriormente expuesto, se puede señalar que el promedio de El Guanaco fue 143% superior al promedio de El Durazno. Esa diferencia también es visible en la cantidad total de volumen de escorrentía subterránea que se almacena en la cuenca por unidad de superficie a lo largo del periodo de estudio, obteniendo así que para la cuenca El Guanaco, se obtuvo un valor de  $0.31 \text{ Hm}^3/\text{km}^2$ , y para la cuenca El Durazno, se presentó un volumen total de  $0.13 \text{ Hm}^3/\text{km}^2$ . La distribución de los volúmenes de escorrentía subterránea se representa en la figura 13 expuesta a continuación.

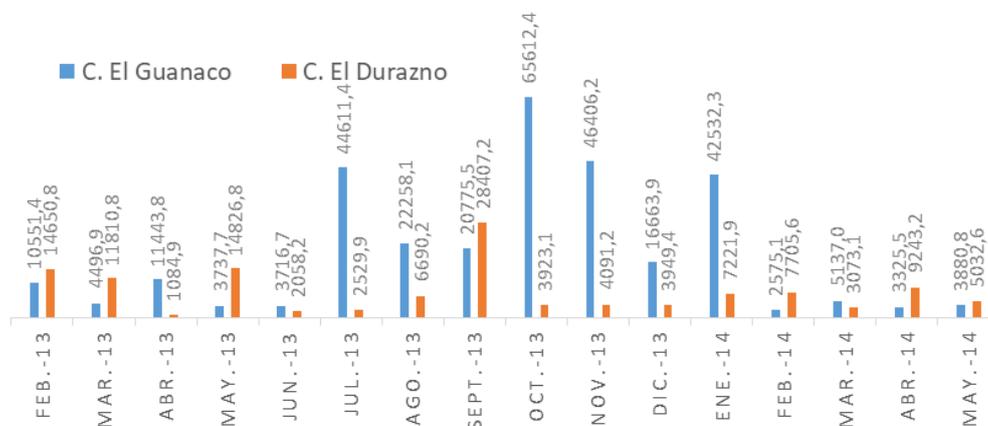


Figura 13. Volúmenes de escorrentías subterráneas

### 3.6 Estadístico U de Mann-Whitney

El análisis estadístico se llevó a cabo en el *software Statgraphics*, en donde se introdujeron los valores de las variables hidrológicas de ambas cuencas, con el objetivo de realizar una comparación entre dos muestras independientes y no paramétricas, a niveles anuales, mensuales y diarios. Para rechazar la hipótesis nula, el valor p debiese ser menor al nivel

de significancia, que en este caso fue de 5%. En la tabla 1 presentada a continuación, se registraron los valores correspondientes al estadígrafo de comparación y los valores p obtenidos para las distintas variables hidrológicas. En base a esta información, se infiere lo siguiente:

- En la comparación estadística realizada a las Precipitaciones históricas, a las

Precipitaciones diarias de meses lluviosos y a los Caudales específicos diarios de meses lluviosos, de acuerdo con el valor-P obtenido (menor que 0.05) se puede concluir que existe una diferencia estadísticamente significativa en estas variables entre cada cuenca con un nivel de confianza del 95%.

– En la comparación estadística realizada a las variables mensuales precipitaciones, caudal promedio, caudal punta, caudal específico, volumen superficial y recesivo a nivel mensual, se puede mencionar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre estas cuencas.

Tabla 1. Resumen de valores estadísticos asociados a la prueba U de Mann-Whitney

VARIABLES HIDROLÓGICAS	ESTADÍSTICO W DE MANN-WHITNEY	VALOR P
Precipitaciones históricas	688	1.88E-07
Precipitaciones mensuales	171	0,109204
Precipitaciones diarias de meses lluviosos	8597.5	3.242E-05
Caudal total promedio mensual	134	0.83578
Caudal Punta mensual	145.5	0.521669
Caudal específico mensual	155	0.317867
Caudal promedio diario de meses lluviosos	10988	0.462127
Caudal específico diario de meses lluviosos	13394	0.0162574
Vol. Superficial mensual	148	0.460936
Vol. Subterráneo mensual	120	0.777428

#### 4. DISCUSIÓN

Con respecto al catastro vegetacional IDE (2016), se estableció que efectivamente existe una diferencia en el tipo de cobertura forestal presente en ambas cuencas, en donde El Durazno (zona andina) se registró principalmente bosque nativo, mientras que en El Guanaco (zona costera) se identificó mayoritariamente plantaciones forestales. En cuanto a los indicadores de forma, se puede mencionar que, si bien existe una diferencia dimensional entre cuencas, (El Durazno alcanza las 103.9 hectáreas y El Guanaco las 67.03 hectáreas), se puede concluir que, según el coeficiente de compacidad, la pendiente media, el coeficiente orográfico y la curva hipsométrica, no existen grandes diferencias en la forma ni en el relieve de las cuencas en comparación, a pesar de las posibles diferencias geográficas entre cordilleras. El único factor diferencial fue la altura media que favoreció evidentemente a El Durazno como cuenca andina. Respecto a la pluviometría histórica anual de las últimas décadas (DGA, 2019), existe una diferencia significativa entre ambas cuencas, porque El Durazno muestra un 93% más de precipitación media anual. Al realizar la comparación del periodo estudiado, 16 meses, El Durazno presenta

una precipitación que es 82% mayor que El Guanaco, ratificando lo anterior. Sin embargo, al realizar la comparación estadística a escala mensual, se observó que según la prueba U de Mann Whitney, no existen diferencias significativas entre cuencas durante el periodo de estudio (16 meses), lo que es esperable por la alta presencia de meses sin lluvia. Debido a esto, se decidió comparar solo las precipitaciones diarias de los meses lluviosos (mayo, junio, julio y agosto) dando como resultado, la existencia de diferencias estadísticamente significativas. Según los resultados obtenidos a partir de los datos fluviométricos, se pudo concluir que, a nivel mensual no existen diferencias significativas en los caudales promedio ni en los caudales punta entre las dos cuencas durante el periodo de estudio. Tampoco se observaron diferencias en los caudales específicos mensuales y esto es muy llamativo, porque existen diferencias importantes de precipitaciones y estas no se expresan por unidad de superficie, lo que da a entender que hay otras variables fuera de las precipitaciones que explican estos comportamientos. Al contrario, con el análisis de los caudales medios diarios específicos de meses lluviosos, se pudo deducir que la cuenca que recibe menor aporte pluvial, presenta mayores caudales específicos,

encontrando diferencias significativas en estos. En relación que la con el volumen total de agua, se obtuvo cuenca El Durazno presentó un mayor volumen de escorrentía superficial específica (23%). Por otra parte, la cuenca El Guanaco, obtuvo un mayor valor de volumen de escorrentía subterránea específica (143%). No obstante, al comparar estadísticamente ambas variables a escala mensual, se evidenció que no existe una diferencia significativa para el periodo analizado.

## **5. CONCLUSIONES**

Las cuencas geográficas no presentan grandes diferencias en términos morfológicos (forma, relieve y red de drenaje) lo cual permite que ambas cuencas puedan ser comparables entre sí. Así también, no existen diferencias significativas en varios aspectos fluviométricos (caudal promedio, caudal punta, caudal específico, volúmenes de caudal superficial y subterráneo) en circunstancias que sí existen diferencias significativas en el monto anual de lluvias, donde en el periodo de estudio, la cuenca El

Durazno presentó un 82% más de precipitaciones que en la cuenca El Guanaco. Por tanto, no existe una mayor relación entre la precipitación y la fluvimetría entre estas cuencas. Esto se puede corroborar al estudiar otra variable, que fueron los caudales específicos diarios de los meses lluviosos, donde si se encontraron diferencias significativas, pero justamente, a favor de la cuenca donde llueve menos, la cual está cubierta por plantaciones forestales. Finalmente, este estudio da cuenta que generalizar ideas preconcebidas parece ser riesgoso, debido que no solamente una mayor presencia de precipitación va a generar un mayor caudal, y tampoco eso se relaciona necesariamente con la cobertura forestal presente. Existen otras variables que están incidiendo y es necesario analizarlas e internalizarlas para realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos en escenarios de variabilidad e incertidumbre climática, y propender con ello a adecuadas políticas públicas que nos aseguren una producción de agua sostenible en el tiempo y espacio, para la región de Ñuble y otras partes del país.

## **REFERENCIAS**

- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2018). Sistema integrado de información territorial. (En línea). [Consultado el 12 agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region16>
- Campos, A. (1992). Procesos del ciclo hidrológico. Editorial universitaria potosina. San Luis, Potosí, México.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2018). Sistema de Información Territorial CONAF. (En línea). [Consultado el 19 julio de 2019]. Disponible en: <https://sit.conaf.cl>
- Dirección General de Aguas (DGA). 2014. Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en las regiones del libertador Bernardo O'Higgins, Maule y Bío-Bío.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2019) Información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas. (En línea). [Consultado el 21 noviembre de 2019]. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- Ezz, H., Gomaah, M., Abdelwares, M. (2019). Watershed Delineation and Estimation of Groundwater Recharge for Ras Gharib Region, Egypt. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. p 202-213.
- Giandotti, M. (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. Istituto Poligrafico dello Stato. 8: 107-117.
- González, F. (2007). Entrevista. *LIGNUM (Chile)* 97, 20-23.
- González, P. (2002). Análisis comparativo sobre las características físicas de las cuencas de la Cordillera de la Costa y de la Cordillera de los Andes, VII Región del Maule. Tesis Ing. Forestal, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Talca, Chile.
- Horton, R. (1932). Drainage basin characteristics. *Trans Am Geophys Union*. 13(1):350- 361.
- Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE). (2016) Catastros de uso de suelo y vegetación (En línea). [Consultado el 30 abril de 2019]. Disponible en: <https://www.ide.cl/index.php/flora-y-fauna/item/1513-catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion>

- Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE). (2016) Modelo Digital de Elevación Alos Palsar Región de Ñuble. [Consultado el 30 abril de 2019]. Disponible en: <https://www.ide.cl/index.php/imagenes-y-mapas-base/item/1575-dem-alos-palsar-region-del-nuble>
- Llamas, J. (1993). Hidrología general, principio y aplicaciones. España. Servicio Editorial Universidad del País Vasco.
- Pizarro, R.; Novoa, P. (1986). Elementos técnicos de Hidrología 1. Instructivos técnicos. La Serena, Chile. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura.
- Pizarro, R; Gonzáles, P; Wittersheim, M; Saavedra, J.; Soto, C. (1993). Elementos Técnicos de Hidrología III. Proyecto Regional Mayor sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas de America Latina y el Caribe. UNESCO-ORCYT. Editorial Universidad de Talca. Talca, Chile.
- Remenieras, G. (1971). Tratado de Hidrología Aplicada. Madrid: Editores Asociados.
- Universidad de Chile. (2010). Informe País. Estado del Medio Ambiente en Chile 2008. Geo Chile. Instituto de Asuntos Públicos. Centro de Análisis de Políticas Públicas. Capítulo 2, Aguas Continentales, pp. 75–80
- Zamfir, A.; Simulescu, D. (2011). Automatic delineation of a watershed using a DEM. Case study – The Oltet watershed. GEOREVIEW: Scientific Annals of Stefan Cel Mare University of Suceava. Geography Series, 20(1), 83-92.

## ANEXO

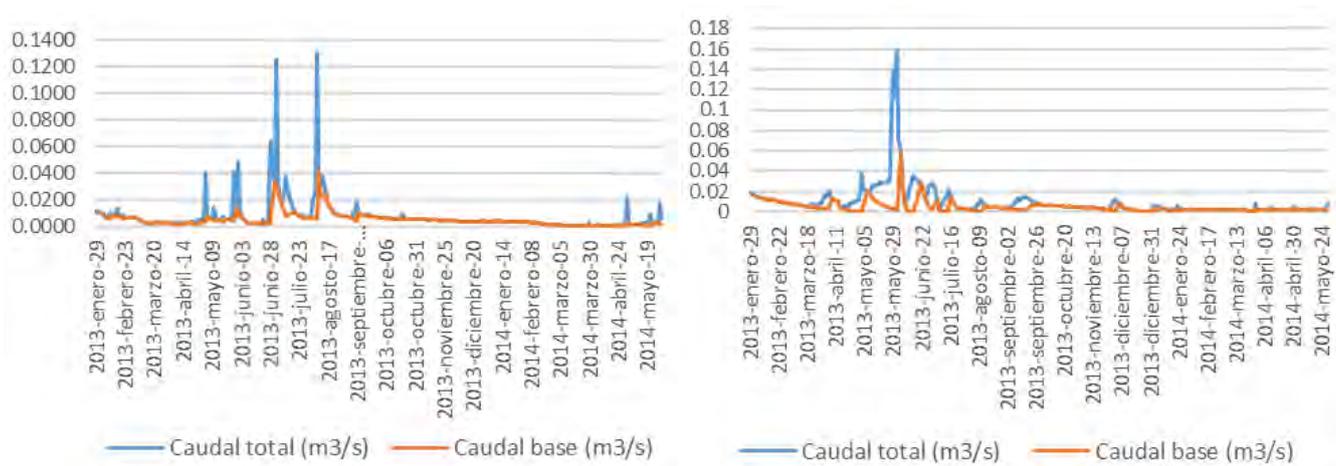


Figura 14. Hidrogramas de crecidas en El Guanaco y El Durazno

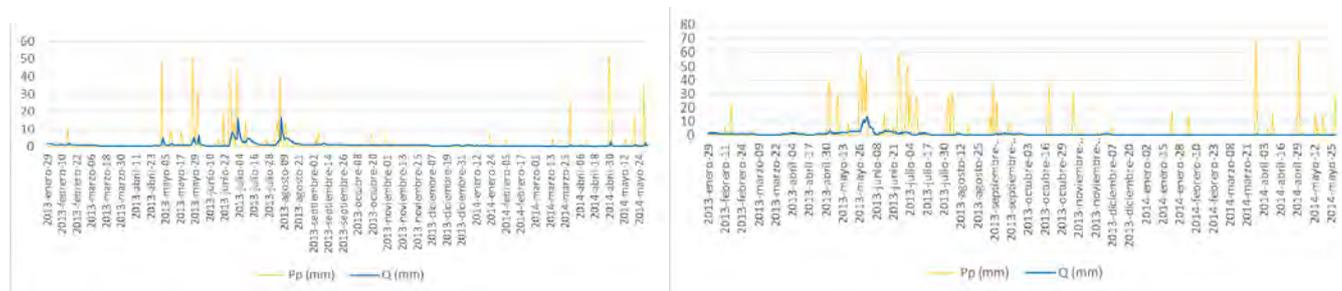


Figura 15. Gráfico del comportamiento fluviométrico y pluviométrico de El Guanaco y El Durazno (mm)



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



## Situación del abastecimiento de agua a las poblaciones rurales en México: estudio de caso en San Luis Potosí

*Situation of water supply to rural populations in Mexico: case study in San Luis Potosí*



Ma. Catalina Alfaro de la Torre<sup>1\*</sup>, Juan Carlos Tejeda González<sup>2</sup>,  
Emiliano García Romero<sup>3</sup>, Felipe Salto Quintana<sup>4</sup>, Regina de Montserrat González  
Balderas<sup>5</sup>

Recibido: 29/09/2021

Aceptado: 30/09/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

En varios países se ha resaltado la brecha existente entre el medio urbano y el rural en lo que respecta a los servicios de abastecimiento de agua y el saneamiento. El establecimiento del Derecho Humano al Agua (DHA) y su reconocimiento representa un reto y a la vez una oportunidad para que los países analicen la situación y establezcan estrategias acordes a la problemática diversa y compleja de las comunidades rurales. En este trabajo la situación del abastecimiento de agua se analizó con base en la cobertura de agua, el costo del servicio y la calidad del agua que se suministra a las comunidades rurales en dos regiones del Estado de San Luis Potosí (Mex) determinándose que el DHA no se cumple, aún y cuando, en su mayoría, las comunidades acceden a una fuente de agua, enfrentan también diferentes problemas que amenazan seriamente la sostenibilidad de este servicio básico.

**Palabras clave:** Derecho Humano al Agua, Calidad de Agua, Comunidades Rurales.

### Abstract

*In several countries, the gap between urban and rural areas has been highlighted about water supply and sanitation services. The Human Right to Water (HRW) has been established and its recognition by the countries represents a challenge and at the same time an opportunity to analyze the situation and establish strategies according to the problematic diverse and complex of the rural communities. In this work, the situation of water supply in rural communities in San Luis Potosí (Mex) was analyzed from different approaches, determining that the HRW is not met, even when most communities access to a water source, also, they face different problems that seriously menace the sustainability of this basic service..*

**Keywords:** Human Right to Water, Water Quality, Rural Communities.

- 
- 1 Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, alfaroca@uaslp.mx, teléfono (52-444) 8262300 ext 6489
  - 2 Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima, tejeda@uacol.mx, teléfono (52-312)3193801
  - 3 Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, emgrcr96@gmail.com, teléfono (52-444) 8262300 ext 6566
  - 4 Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, f.saltoquintana@outlook.com, teléfono (52-444) 8262300 ext 6566
  - 5 Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, regina.gonzalez@uaslp.mx, teléfono (52-444) 8262300 ext 6566

## 1. INTRODUCCIÓN

Una vasta literatura conformada por publicaciones científicas e informes de organizaciones nivel mundial describen la problemática relacionada con la cobertura del abastecimiento de agua y del saneamiento tanto en las ciudades como en las pequeñas poblaciones mostrando condiciones contrastantes entre el Norte y el Sur, entre los países más desarrollados y los menos desarrollados (Adams y Smiley, 2018; Liverman, 2018; UN-GLAAS, 2019; Weststrate et al., 2019; UN-SDGS Reporte 2020 y otros). Para disminuir la brecha entre regiones del mundo, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con el apoyo fundamental de los países se han dado a la tarea de guiar las acciones prioritarias para incrementar la cobertura de agua (y saneamiento) en los países miembros. De esta forma, en el período de los años 2002-2015 se implementaron los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) que en la Meta 7c (ODM-7c) estableció reducir a la mitad la población que no tenía acceso sostenible al agua y al saneamiento básicos y esto antes de 2015. A la conclusión de los ODM, los países reportaron haber cumplido con las metas de cobertura de agua. En la realidad es posible que la meta no se haya cumplido (Martínez-Santos, 2017; Liverman, 2018; Weststrate et al., 2019). De acuerdo con Martínez-Santos (2017) si bien, oficialmente se logró el objetivo, dado que los indicadores se enfocan en el acceso a fuentes de agua mejoradas, en realidad parece que los parámetros de medición no fueron los adecuados por el hecho que en muchos casos las fuentes de agua siguen estando contaminadas, no son fiables o no son asequibles. Por otro lado, se identificaron diferencias de importancia entre el abastecimiento de agua a las áreas urbanas y a las áreas rurales; en este último, aunque se avanzó en una mayor cobertura de agua, la pregunta que surge es si ésta reúne la calidad como “agua potable” (Weststrate et al., 2019). El acceso a una fuente mejorada de agua no significa que es segura, que es potable. Una situación similar se presentó en el tema de saneamiento quedando situaciones a resolver como es que la población cuente con infraestructura sanitaria apropiada y reducir el fecalismo al aire libre, esto sobre todo en el medio rural.

Una nueva etapa inicia en el 2015, en que los países miembros de la ONU aprobaron los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de la Agenda 2030 en un esfuerzo de mejorar las condiciones de vida de la población. Así, se

estableció en el Objetivo 6 (ODS-6) “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” hacia 2030 (ONU, 2021). De acuerdo con el Reporte Global de la ONU-Agua (UN-GLAAS, 2019), en lo que respecta al ODS-6, los países de la región de América Latina y el Caribe enfrentan un gran desafío ya que a pesar de los esfuerzos para aumentar la cobertura de los servicios de agua potable y saneamiento, aún existen entre 17 y 53 millones de personas que, por diversas razones, aún carecen de servicios mejorados de agua y saneamiento respectivamente siendo las zonas rurales las que mayormente presentan esta condición (WHO/UNICEF, 2019). Se entiende por servicios mejorados que la población tenga acceso a agua potable (libre de contaminantes que afecten su salud), accesible y disponible cuando se necesita.

De acuerdo con uno de los últimos reportes del avance mundial en el cumplimiento de los ODS (UN-SDGS Reporte 2020), la proporción de la población global que tiene acceso a “servicios de agua potable gestionados de forma segura” se incrementó de 61% en el año 2000 a 71% en 2017; 2.2 billones de personas en el mundo aún no tienen acceso al servicio de agua potable y de esta cifra, 785 millones no tienen acceso a servicios básicos de agua (UN-SDGS Reporte 2020). En el tema de saneamiento, la situación es algo más compleja ya que en el mismo período, la población con acceso a un “servicio de saneamiento gestionado de forma segura” se incrementó de 28% a 45% y actualmente 4.2 billones no tienen acceso a un servicio de saneamiento apropiado de los cuales 2 billones no tienen acceso a los servicios básicos y 673 millones de personas aun practican el fecalismo al aire libre. Aunque este documento se enfoca al tema del agua, ambos problemas no se pueden disociar completamente debido a que la inapropiada disposición de las aguas residuales domésticas es una de las causas comunes de contaminación de las fuentes de agua destinadas al abastecimiento.

Situación en México. De acuerdo con el informe 2020 de los ODS que muestra el avance en el cumplimiento del indicador 6.1.1 refiere que el 43% de la población en México cuenta con un servicio de agua potable gestionado de forma segura, notablemente inferior al promedio mundial que es de 74%. De acuerdo con el informe, la población tiene acceso a una fuente mejorada de agua, asumimos que se refiere a la población urbana debido a que, en el medio rural, el 98% tiene acceso al menos a un

servicio básico, 2% no cuenta con servicio de agua lo que representa aproximadamente a 2.5 millones de habitantes (UN-SDGS Reporte 2020; datos reportados en <https://sdg6data.org>).

Las instancias oficiales indican que a la par del último reporte de los ODM en México, desde 2010, nuestro país inició un proceso para monitorear el acceso al agua denominado la Agenda del Agua 2030 con el fin de definir los aspectos necesarios para la sostenibilidad hídrica, teniendo como instancia responsable del seguimiento a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). De acuerdo con este organismo (CONAGUA, 2017), el abastecimiento de agua a la población urbana y rural pasa por serias dificultades, entre algunas de las causas: la variación climática, la sobre-extracción de agua en aquellas regiones donde se depende principalmente de agua subterránea, la contaminación de los cuerpos de agua superficiales, entre otras. Sin embargo, la CONAGUA también reportó que el 91.5% de la población del país tiene cobertura de alcantarillado y un 95.3% tiene acceso a agua entubada (CONAGUA, 2017). Faltaría diferenciar el medio urbano del medio rural.

La realidad podría ser algo diferente. Como ejemplo, los resultados del último censo nacional de población y vivienda realizado en 2020 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) indican que, a nivel nacional, el 96.14% de las viviendas disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda y particularmente, 83.90% disponen de agua entubada y se abastecen del servicio público, es decir, no todas las viviendas reciben agua entubada que proviene de un servicio público como podría ser a través de un organismo operador, servicio municipal u otro, que pudiera asegurar un proceso de potabilización previo a la distribución. El 3.45% no disponen de agua entubada (INEGI, 2020). De acuerdo con los datos, al menos se puede decir que los informes nacionales son concordantes en lo que respecta al porcentaje de la población que recibe agua entubada, sin conocer con claridad cuál es la calidad de esta. Sin embargo, si se toma en cuenta lo que se reporta con respecto del indicador 6.1.1 de los ODS en México, menos de la mitad de la población cuenta con un servicio de agua potable gestionado de forma segura.

Por otro lado, en el mundo, el Derecho Humano al Agua y al Saneamiento (DHAS) tiene sus antecedentes en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua (Mar del Plata, 1977) y en el Decenio Internacional del Agua Potable y del

Saneamiento Ambiental (1981-1990); el DHAS fue reconocido en la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2010 (AG-ONU, 2010). México reconoció este derecho a nivel constitucional desde 2012 lo que representó un avance significativo pues obliga a los gobiernos de Estados y Municipios a procurar una mayor cobertura de agua potable, sin embargo, también plantea un gran desafío, dadas las condiciones de los recursos naturales como indica CONAGUA. El reconocimiento del DHAS ha obligado a la evolución de los sistemas de gestión de abastecimiento de agua y a una nueva forma de burocracia de los actores responsables del suministro de agua potable a la población (Valdés de Hoyos y Uribe Arzate, 2016). En lo que respecta al abastecimiento de agua, la ONU ha especificado los factores que se deben cumplir en cualquier circunstancia: disponibilidad, calidad, accesibilidad, no discriminación y acceso a la información. Sin embargo, es erróneo suponer que estos factores pueden ser medidos o exigidos bajo los mismos parámetros en cualquier lugar y tiempo, puesto que existen circunstancias que provocan variaciones en el nivel del cumplimiento (Domínguez et al., 2013).

En este trabajo se analiza la situación del abastecimiento de agua en el Estado de San Luis Potosí (México) y de acuerdo con el INEGI (2020), el 92.35% de las viviendas disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda, 73.96% disponen de agua entubada y se abastecen del servicio público, y 7.40% no disponen de agua entubada. Claramente, estos indicadores evidencian una problemática más seria en este Estado del Centro de México con respecto del nivel nacional.

En este contexto, se propuso analizar la situación de la cobertura de agua potable en el área rural en el Estado de San Luis Potosí (SLP) registrando la situación del abastecimiento desde los aspectos de la administración del recurso y su calidad, la participación de los actores involucrados, entre otros, bajo un proceso de Evaluación Ambiental Estratégica. Lo anterior con el propósito de identificar los factores que mayormente inciden en la problemática de la gestión y el abastecimiento de agua. Este trabajo fue llevado a cabo en dos regiones del Estado que dependen principalmente del agua subterránea para el abastecimiento a la población: la Zona Media y la Zona Altiplano, que conforman dos de las cuatro regiones del Estado y corresponden a 27 de sus 58 municipios.

## 2. REGIÓN DE ESTUDIO

El presente trabajo se realizó en el estado de San Luis Potosí, que tiene una población de 2.8 millones de habitantes y 58 municipios. Estos últimos se agrupan en cuatro regiones, por compartir condiciones similares como el clima: Altiplano, Huasteca, Centro y Zona Media (ver Figura 1). Este proyecto analiza la situación del abastecimiento de agua en la Zona

Media con el 10.0% de la población del estado, esto es 282,761 habitantes y en la Zona Altiplano con el 12.3%, es decir 346,904 habitantes. En estas regiones, aproximadamente la mitad de la población vive en el área rural. El suministro de agua a la población depende de la extracción de agua subterránea, aunque en la Zona Media se tiene una mayor disponibilidad de agua.

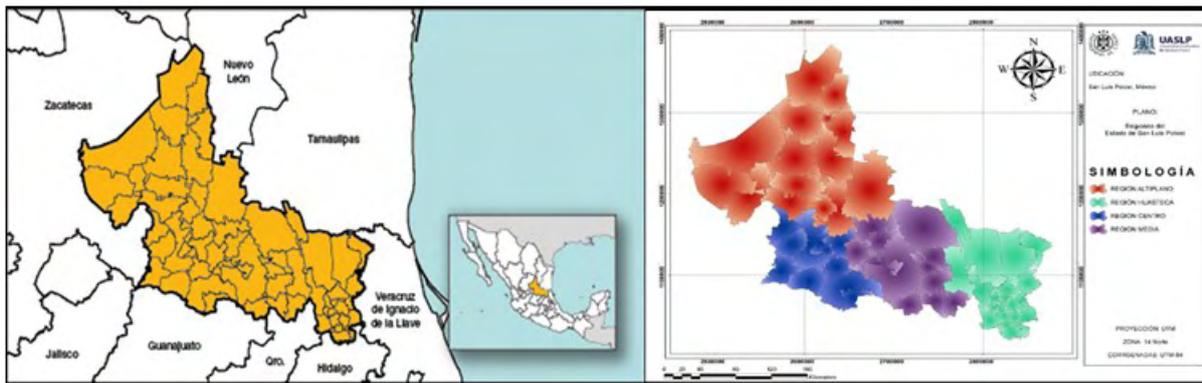


Figura 1. Localización del Estado de San Luis Potosí en la República Mexicana y su división en cuatro regiones. Imágenes tomadas de INEGI (2020) y Hernández et al. (2019)

### 2.1 Región Altiplano

Comprende 15 municipios y ocupa la mayor extensión territorial del Estado (46.5%), de clima seco-desértico, con una precipitación anual entre 300 y 400 mm. Forma parte del Altiplano Mexicano. Se practica mayormente la agricultura de temporal, la agricultura tecnificada y limitadamente la agricultura de riego, el pastoreo de ganado caprino y ovino, la minería como fuentes de recursos económicos. Otras actividades económicas importantes son el comercio y el turismo. Dadas las condiciones de precipitación y las características fisiográficas existen muy pocos aprovechamientos superficiales y los que hay son de baja capacidad; en varias localidades se tienen bordos para almacenar agua sobre todo para abrevadero (CONAGUA-UJED, 2013).

### 2.2 Región Zona Media

Comprende 12 municipios y ocupa el 10% de la superficie del Estado en su porción central, su clima es cálido subhúmedo, con una precipitación anual mínima de 500 mm y una máxima de 1200 mm. Cuenta con abundantes recursos hídricos mayormente de tipo subterráneo, aunque existen algunos aprovechamientos superficiales de importancia como el Río Verde, el manantial de la Media Luna y otros

que se utilizan sobre todo para riego agrícola. Se practica la agricultura de riego en gran escala, también la agricultura tecnificada y de temporal, además de la ganadería. Otras actividades económicas son el comercio y el turismo. En 5 municipios de esta región habitan comunidades indígenas de origen Pame.

## 3. METODOLOGÍA

Como se describe previamente, este trabajo se realizó con énfasis en las comunidades consideradas rurales en dos regiones del Estado de San Luis Potosí: Altiplano y Zona Media. Dado que el número de comunidades en el área rural es alto y para hacer posible este estudio, se eligieron todas las comunidades de 500 a 2,500 habitantes en los municipios que conforman las Regiones Altiplano y Zona Media. Los estudios se realizaron en dos diferentes periodos de tiempo: Región Altiplano (2012-2015) y Región Zona Media (2018-2021), por cuestiones de presupuesto. Las comunidades se eligieron con base a los datos de población reportados por INEGI en el momento del estudio correspondiente. Con el propósito de identificar las condiciones que inciden en que la población tenga

acceso a abastecimiento de agua y que este sea conforme a lo indica el Derecho Humano al Agua (accesible, asequible y de calidad), en cada Región el estudio se realizó en dos etapas. En la primera etapa se entrevistaron las autoridades municipales y se les presentó el proyecto. Se visitó cada una de las comunidades para obtener la información básica sobre el abastecimiento de agua y mediante GPS (Garmin 64s) se georreferenciaron cada una de las fuentes de agua en uso. Como segunda etapa se realizó una campaña para la toma de muestras de agua de cada una de las fuentes de abastecimiento de la comunidad previamente identificadas y georreferenciadas y se analizaron.

### *3.1 Etapa 1. Caracterización de las condiciones del abastecimiento de agua en las comunidades*

En esta etapa se entrevistaron a las autoridades municipales para conocer los procedimientos administrativos y técnicos relacionados con el abastecimiento del agua tanto en la cabecera municipal como en las comunidades rurales elegidas. Se visitó cada una de las comunidades elegidas y se entrevistaron a los responsables de la gestión del agua a nivel local: comités de agua, comisariado ejidal y/o responsable de la operación de los pozos (pocero). Con la información recopilada, se generó un Padrón de Fuentes de Abastecimiento por municipio y una base de información con datos de los responsables del servicio de agua, tarifas de agua, costo del suministro de agua a la población y condiciones de la infraestructura, estrategias para atender situaciones de escasez del recurso, y otros datos correspondientes a cada comunidad.

### *3.2 Etapa 2. Estudios de calidad del agua*

En una segunda visita, en cada comunidad se tomaron muestras de agua de todas las fuentes de abastecimiento en uso identificadas las cuales correspondieron en su gran mayoría a pozos. En donde no fue posible coleccionar la muestra del pozo, se hizo de la pileta a donde se bombea el agua para ser clorada y distribuida a la población. Algunas pocas fuentes de abastecimiento correspondieron a manantiales, ollas de agua e incluso agua de lluvia almacenada que la población manifestó utilizar para beber y/o para cocinar. Se coleccionaron muestras para el análisis de sulfatos, fosfatos, nitratos, cloruros, fluoruro, alcalinidad y dureza totales, metales totales (Cu, Pb, Cr, Cd, As, Ni, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K; analizados por Espectrofotometría de Absorción Atómica VARIAN Spectra220 Sistema Duo) y coliformes totales y fecales. En el sitio de colecta de

las muestras se determinaron los parámetros de pH, temperatura (°C), conductividad (µS/cm), oxígeno disuelto (mg/L y %), potencial redox (mV), alcalinidad total (por titulación con HCl 0.08N; mg CaCO<sub>3</sub>/L) y cloro libre residual (HANNA Instruments HI 701; mg/L); para la medición de estos parámetros en campo se utilizaron medidores portátiles (Conductronic). La colecta de muestras se realizó con base en los procedimientos descritos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-230-SSA1-2002) colectándose al menos un set de muestras para todos los análisis que se indican, por fuente de abastecimiento en cada comunidad visitada. En el análisis de las muestras se utilizaron métodos estándar; no se hizo la determinación de sustancias orgánicas. Los estudios de la calidad del agua se realizaron en el Laboratorio de Elementos Traza de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. En la Región Altiplano el muestreo de agua se llevó a cabo durante 2014 y se tomaron muestras de un total de 74 fuentes de abastecimiento (7 correspondieron a la fuente principal de agua en las Cabeceras Municipales). En la Región Zona Media, las muestras de agua se tomaron entre septiembre 2019 y agosto de 2020, se caracterizó un total de 95 fuentes de abastecimiento correspondientes a las cabeceras municipales y 64 comunidades rurales. Los resultados de calidad del agua se interpretaron con base a la Norma Oficial Mexicana para agua de uso y consumo humano (NOM-127-SSA1 Modificada en el Año 2000) y las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011; 2017). Una vez concluido el levantamiento de información en campo y los estudios de calidad del agua, se elaboró un informe por municipio el cual se presentó y entregó a las autoridades correspondientes.

Para finalizar el proyecto en cada región, se integró un Plan de Gestión Integral para el Abastecimiento de Agua Potable (PGIAP) mismo que fue entregado a las autoridades estatales y municipales correspondientes. Dicho documento se generó como una herramienta de apoyo para los tomadores de decisiones en la materia, en la región y se basó en los principios de la Evaluación Ambiental Estratégica, con el propósito de proponer las mejores alternativas para el abastecimiento de agua en las comunidades en la región. En este trabajo esencialmente se resaltan los principales factores que inciden en la problemática de abastecimiento de agua en las regiones estudiadas y que resultaron del análisis del PGIAP.

#### **4. RESULTADOS**

La visita y la entrevista con las autoridades responsables del abastecimiento de agua tanto en las Cabeceras Municipales como en las localidades rurales de las regiones del Estado de San Luis Potosí en estudio, así como la consulta a diversos documentos permitieron identificar variadas condiciones en lo concerniente a la gestión y a la administración del agua. En las dos regiones estudiadas, las fuentes de agua corresponden a pozos, en pocas localidades a manantiales y/o colecta de agua de lluvia o acarrear agua de una corriente cercana (Río Santa María en Santa Catarina, SLP).

El Cuadro S1 en Materiales Suplementarios indica sobre los responsables de la administración del agua y brevemente se describe el suministro, el número de localidades visitadas y el número de abastecimientos de agua analizados en este trabajo. Los municipios cuentan con Organismos Operadores que son los responsables del abastecimiento de agua a la cabecera municipal y en algunos casos, también abastecen a localidades rurales cercanas, que no cuentan con una fuente de abastecimiento o tienen un pozo cuya agua es salobre como es el caso de dos localidades en el municipio de Ciudad del Maíz a quienes el organismo operador suministra pipas de agua y hace el cobro correspondiente por el servicio. En el municipio de Río verde, once de veintiséis localidades rurales estudiadas son administradas por el organismo operador de la cabecera municipal, el cual nombra a una persona de la localidad para operar el pozo o abrir las válvulas de la red de distribución del agua; los habitantes de las localidades se quejan del alto costo del servicio que deben pagar aun cuando no reciben agua de manera regular. En el Altiplano, el municipio de Villa de Guadalupe es abastecido por el organismo operador del municipio de Matehuala. Entre el Altiplano y la Zona Media existe una diferencia clara en la forma en que las localidades rurales se organizan para la administración y gestión del agua. En lo general, el abastecimiento de agua se administra a través de Comités de Agua (conformado por presidente, secretario y tesorero), Encargado del Agua, Comisariados Ejidales o se tiene al menos un responsable de la operación de los pozos (pocero). En el Altiplano, los comités de agua que generalmente son coordinados por el comisariado ejidal como presidente del comité son los responsables de la gestión del agua de la comunidad, de clorarla y suministrarla, de hacer el cobro correspondiente por el servicio y efectuar o coordinar

las operaciones de mantenimiento de la infraestructura; el comisariado hace las gestiones ante autoridades municipales, estatales o federales sobre apoyos para el mantenimiento o reemplazamiento de la infraestructura, para un nuevo pozo o para el aprovisionamiento de las sustancias químicas para la desinfección del agua la cual se realiza a nivel de piletas de distribución, generalmente. En la Zona Media, la administración del servicio de agua corresponde a un Comité de Agua o Junta de Agua conformada por presidente, secretario, tesorero y pocero, todos miembros de la comunidad, pero no son necesariamente parte del comité ejidal, solo en pocas localidades el comité ejidal nombra a un comité o a un responsable del agua; en algunas localidades, solo se nombra a un responsable del agua o a un pocero. En todos los casos, los comités y responsables del agua se hacen cargo de cobrar las tarifas del agua, buscar los apoyos para el mantenimiento de la infraestructura (reparación de bombas, reemplazo de transformadores, tubería y otros) ya que los recursos económicos por las tarifas del agua son insuficientes para cubrir sus adeudos de electricidad. Tanto en el Altiplano como en la Zona Media, menos del 10% de las localidades visitadas cuentan con medidores de agua, mayormente se establece una tarifa que se cobra cada mes o dos meses. Lo que se recolecta se utiliza para cubrir el salario de por lo menos el pocero o del encargado de operar el sistema de bombeo del agua, las cuotas de electricidad y el mantenimiento de la infraestructura. El pocero también es el responsable de llevar el control del tandeo por zonas de la comunidad. En las localidades rurales, las tarifas de agua se calculan con base en el recibo de electricidad, el salario del pocero, y pocas veces se prevén los recursos para el mantenimiento de la infraestructura. La morosidad y la falta de recursos para hacer frente a los imprevistos son causa de la suspensión del servicio de agua. Para el restablecimiento del servicio, cuando los habitantes no lo pueden resolver, por ejemplo, por el robo de transformadores (caso en Guadalcázar en 2014) los pozos no se pueden operar de forma que los responsables del agua buscan los apoyos con el gobierno municipal, estatal o buscan acceder a apoyos federales para restituir la infraestructura. Entre tanto, los habitantes se proveen de agua por sus propios medios y costos; lo mismo sucede si su fuente de agua es un manantial o una corriente de agua superficial, las personas acarrear agua a sus domicilios por sus propios medios.

En cuanto al servicio del agua hay diferencias entre localidades tanto en las tarifas que se aplican como en la estrategia de abastecimiento que usualmente es el tandeo (Cuadro S1). Las tarifas de agua variaron de \$50 a \$107 MXN por mes en la Zona Media, y fueron inferiores a \$100 MXN/mes de acuerdo con el estudio del Altiplano; es necesario resaltar que, en el municipio de Santa Catarina, en la Zona Media no se cobra el servicio de agua. Una problemática que es común se debe a la morosidad en el pago de las tarifas de agua que llega a impactar a la comunidad porque aunado a las tarifas bajas, los recursos generados por el pago del servicio no les permiten cubrir sus adeudos de electricidad. Situaciones similares han sido documentadas en otras comunidades rurales en México (Soares, 2021).

Como se indicó, las tarifas de agua son variables y les asegura un suministro de entre 6 y 10 m<sup>3</sup>. En ninguna de las comunidades rurales visitadas en ambas regiones del Estado se encontraron plantas de potabilización; el único proceso que es generalizado corresponde a la cloración por inyección de soluciones de cloro a nivel del pozo, en forma previa a la distribución a la comunidad o la aplicación de soluciones de hipoclorito de calcio suministradas a nivel de la pileta de distribución, mediante procesos rudimentarios que no aseguran la desinfección del agua. Cabe señalar que aún en las cabeceras municipales no se cuenta con plantas potabilizadoras (a excepción de dos municipios, Matehuala y Rioverde), solamente se desinfecta. De esta forma, aunque el costo por potabilización no impacta las tarifas del agua (a excepción por lo que se invierte en la cloración), éstas deberían revisarse ya que lo que se recauda no es suficiente para cubrir el pago de energía eléctrica, el mantenimiento de la infraestructura y el pago del personal. Una característica en varias de las comunidades rurales visitadas es su dispersión y el asentamiento de viviendas en las colinas, de forma que el costo por bombeo seguramente será mayor incidiendo en el costo del suministro del agua, aunque la tarifa por vivienda es la misma para toda la población. En la mayoría de las cabeceras municipales, el servicio es medido, se aplica una tarifa de base que permite sostener la administración, la red de suministro y el tratamiento que es solamente cloración. Como se indica en el Cuadro S1, el tandeo es la estrategia que más se utiliza en el abastecimiento de agua, se aplica por sector o por cierto número de horas por día, o cada tercer día, o cada tres días, o tres veces por semana, que es lo comúnmente encontrado en las

localidades rurales. En este sentido, los habitantes almacenan el agua en tambores o tambos, en piletas o tinacos de forma que cotidianamente no cuentan con el servicio agua para todos los usos en sus casas. Además, escasamente se clora a nivel de pileta de distribución ya sea porque no cuentan con las sustancias químicas, los poceros no están capacitados para esta operación o las personas de la comunidad no les agrada el agua clorada. Algunas personas manifestaron utilizar esta agua solo para cocinar, lavar, para regar sus plantas, dar agua a sus animales y otros usos en la casa, comprar agua purificada para tomar, y en la realidad reconocen consumir el agua que se les abastece, sobre todo las personas adultas. Las personas saben que su alternativa es el consumo de agua purificada para tomar y cocinar, algunas familias la compran (uno a dos garrafones por semana) pero existen familias que sus recursos económicos no les permiten cotidianamente contar con agua purificada. Un aspecto que se percibió muy positivo en la Zona Media es el esfuerzo de la población para instalar infraestructura para colecta de agua de lluvia a nivel comunitario (Villa Juárez) o a nivel de vivienda (Villa Juárez, Rayón, Santa Catarina). Pueden colectar hasta 10m<sup>3</sup> en la temporada de lluvias y de acuerdo con las personas, es agua de muy buen sabor, les es suficiente para varios meses y la utilizan para beber y cocinar. Un aspecto que se consideró negativo es que la baja disponibilidad de agua en algunas comunidades rurales del Altiplano (Villa de Guadalupe) y de la Zona Media (Ciudad del Maíz, Rioverde) les hace completamente dependientes del suministro a partir de fuentes de agua que se localizan en otro municipio o en la cabecera municipal dependiendo muchas veces del suministro con pipas. Los resultados de la calidad del agua se muestran en las tablas 1 y 2. Se indican las concentraciones promedio (y la desviación estándar), así como las concentraciones mínimas y máximas encontradas. La determinación de estos valores se realizó utilizando la herramienta XRealStatistic en Excel®. Para aquellos parámetros en que más del 20% de las concentraciones fueron menores al límite de detección, se indica como valor mínimo el límite de detección y como valor máximo, el determinado en el análisis de las muestras. Los valores de los parámetros determinados de la calidad del agua en cada sitio se compararon con los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011; 2017), y por la Norma Oficial Mexicana para agua de uso y consumo humano vigente (NOM-127 modificación año 2000).

Tabla 1. Parámetros de la calidad del agua determinados en muestras de agua de las fuentes de abastecimiento en la Región Altiplano, San Luis Potosí (N=74)

Parámetro	Unidades	Promedio	SD	Min	Max	OMS	México
pH		7.49	0.31	6.99	8.26	6.5-9.5	6.5-8.5
Temperatura	°C	22.1	4.6	12.7	35.6	-	-
Conductividad	mS/cm	1.15	0.91	0.22	5.53	-	-
Oxígeno Disuelto	mg/L	4.8	1.7	1.4	9.9	-	-
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	203.9	64.8	72.8	483.6	-	-
Fluoruro	mg/L	1.10	1.10	0.02	4.7	1.5	1.5
Cloruro	mg/L	86.6	176.0	<5	1286	250	250
Nitrato	mg/L	5.3	5.6	<0.5	27.2	50	10
Sulfato	mg/L	333.1	355.9	<10	1773	500	400
Sodio	mg/L	107.7	131.2	0.2	692.8	200	200
Potasio	mg/L	10.4	19.2	<1	153.4	-	-
Calcio	mg/L	84.7	41.0	2.6	207.2	-	-
Bario	mg/L	0.6	0.2	0.14	1.05	1.3	0.7
Hierro	mg/L	-	-	<0.1	4.64	-	0.3
Zinc	mg/L	-	-	<0.1	54	2	5
Plomo	µg/L	-	-	<1.0	78.3	10	10
Arsénico	µg/L	-	-	<1.0	141.2	10	25
Cromo	µg/L	-	-	<0.5	12	50	50
Cobre	µg/L	-	-	<0.5	191.2	2000	2000
Cadmio	µg/L	-	-	<0.1	2.1	3	5
Coliformes totales	NMP/100mL	11	34	0	0	No específica	Ausencia
Coliformes fecales	NMP/100mL	4	18	240	150	Ausencia	Ausencia

Cuando se comparan las concentraciones determinadas para cada uno de los parámetros de la calidad del agua con los valores recomendados por la OMS (2011; 2017) y la normativa mexicana para agua de uso y consumo humano (NOM-127 Modificación año 2000), se identifica la siguiente problemática de la calidad del agua. Para la Región Altiplano (tabla 1, figuras 2 y 3):

1. Alto contenido de sales (sulfatos, cloruros, sodio) en muestras de pozos profundos en los municipios de Salinas, Villa de Ramos, Villa de Arista, Villa Hidalgo, Villa de la Paz, Matehuala, Guadalcázar, Vanegas y Santo Domingo. El análisis de las familias de agua indicó que éstas son de los tipos bicarbonatada-cálcicas o bicarbonatadas-sódicas y sulfatadas-cálcicas lo cual explica la presencia de las sales (Figura 3).
2. Contaminación por nitratos mayormente en pozos someros en Villa de Ramos, Villa de

Arista, Villa Hidalgo, Villa de la Paz y Guadalcázar.

3. Contaminación con fluoruro y arsénico en muestras de pozos profundos que represento el 19% de los abastecimientos analizados (Salinas, Villa de Arista, Villa de Ramos, Villa Hidalgo, Villa de la Paz, Matehuala, Guadalcázar, Vanegas, Venado, Charcas, Santo Domingo). Esta problemática ya ha sido documentada previamente (Banning et al., 2012; Cardona et al., 2018).
4. La contaminación bacteriológica se detectó principalmente en muestras de pozos someros y piletas de almacenamiento. Solo en un 22% de las fuentes de abastecimiento se detectó cloro libre residual en concentraciones menores a 0.5mg/L lo cual no asegura que el agua llegue desinfectada a las viviendas. Algunas personas comentan que el sabor del agua es desagradable cuando está clorada por lo que, sobre todo las

personas adultas mayores, no la aceptan para beber.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 77.9% de las fuentes de abastecimiento analizadas en la región Altiplano presentó al menos un parámetro de la

calidad del agua fuera de la norma mexicana para agua potable (NOM-127); en el 36.4% de los abastecimientos, las concentraciones de arsénico fueron superiores a lo que marca la guía para agua potable de la OMS (2011, 2017).

Tabla 2. Parámetros de la calidad del agua determinados en muestras de agua de las fuentes de abastecimiento en la Región Zona Media, San Luis Potosí (N=95)

Parámetro	Unidades	Promedio	SD	Min	Max	OMS	Mex
pH		7.15	0.45	5.62	9.28	6.5-9.5	6.5-8.5
Temperatura	°C	25.8	2.6	21.0	33.7	-	-
Conductividad	mS/cm	0.898	0.593	0.017	3.550	-	-
Oxígeno Disuelto	mg/L	5.1	1.4	2.1	8.5	-	-
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	236.2	69.8	2.0	440	-	-
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	440.9	401.9	<10	2138	-	400
Fluoruro	mg/L	0.85	1.06	0.01	5.00	1.5	1.5
Cloruro	mg/L	22.9	30.5	<5	186.6	250	250
Nitrato	mg/L	6.8	7.0	0.4	31.9	50	10
Sulfato	mg/L	229.9	388.6	0.1	1999	500	400
Sodio	mg/L	32.3	44.7	0.05	285.4	200	200
Potasio	mg/L	4.2	4.8	0.2	35.0	-	-
Calcio	mg/L	124.7	96.8	2.9	528.2	-	-
Magnesio	mg/L	24.1	29.3	1.0	176.9	-	-
Bario	mg/L	0.10	0.09	0.05	0.55	1.3	0.7
Zinc	mg/L	-	-	<0.1	4.5	2	5
Hierro	µg/L	-	-	<0.1	67.0	-	300
Manganeso	µg/L	-	-	<0.5	38.4	400	150
Arsénico	µg/L	-	-	<1.0	44.0	10	25
Cromo	µg/L	-	-	<0.5	10.9	50	50
Cobre	µg/L	-	-	<0.5	45.3	2000	2000
Cadmio	µg/L	-	-	<0.1	2.0	3	5
Coliformes totales	NMP/100mL	215	541	0	2400	No especifica	Ausencia
Coliformes fecales	NMP/100mL	35	101	0	460	Ausencia	Ausencia

Para la Región Zona Media (tabla 2, figuras 3 y 4):

1. Presencia de sales. Las personas manifestaron que el agua es dura, es decir, posee un alto contenido de carbonatos y sulfatos de calcio y/o magnesio. Algunas fuentes de abastecimiento correspondieron a agua con alta dureza y conductividad mayor a 1000 µS/cm; aunque también se detectaron aguas saladas (conductividad >1000 µS/cm) pero con dureza menor a 500 mg/L y concentraciones de sulfatos (>400 mg/L) en 18.9% de las fuentes de abastecimiento analizadas. El análisis de las familias de agua

indicó que éstas son de los tipos bicarbonatada-cálcicas y sulfatadas-cálcicas, lo que es congruente con la geología de la región (figura 3; García Romero, 2020).

2. Contaminación por nitratos (>10mg/L) en agua de pozos localizados en sitios con actividad agrícola o en pozos poco profundos, en comunidades de siete municipios (Rio verde, Cárdenas, Ciudad del Maíz, Cerritos, Ciudad Fernández, Alaquines, Lagunillas). No se detectaron concentraciones de nitrito en ninguno de los casos.

3. Presencia de fluoruro (>1.5mg/L) en 21% de las fuentes de abastecimiento estudiadas. El Estado de San Luis Potosí presenta una problemática debido a la presencia de fluoruros en agua, principalmente en la ciudad capital y en el Altiplano Potosino (Cardona et al., 2018).
4. Contaminación por metales y arsénico. Los resultados no mostraron una problemática de preocupación con respecto a los metales, pero se determinaron concentraciones de arsénico mayores a la permitida por la Normativa Mexicana (NOM-127; 25 µg/L) o la recomendada por la OMS (10 µg/L). La presencia de arsénico ha sido documentada ampliamente (Banning et al., 2012).
5. Contaminación bacteriológica. Se determinó principalmente en muestras de pozos someros, piletas de almacenamiento, manantiales o cuando la muestra fue colectada del grifo. Este problema está asociado a que en la mayoría de las fuentes de abastecimiento no se clora el agua. Del total de fuentes de agua en comunidades rurales (n=64), en el 25.3% se aplicaba un proceso de desinfección y el 14.7% el cloro libre residual estuvo dentro de lo que marca la NOM-127. En las cabeceras municipales, se clora a nivel de pozo por inyección de cloro en la tubería o a nivel de las piletas de almacenamiento utilizando pastillas de hipoclorito de calcio o una combinación con gas cloro.

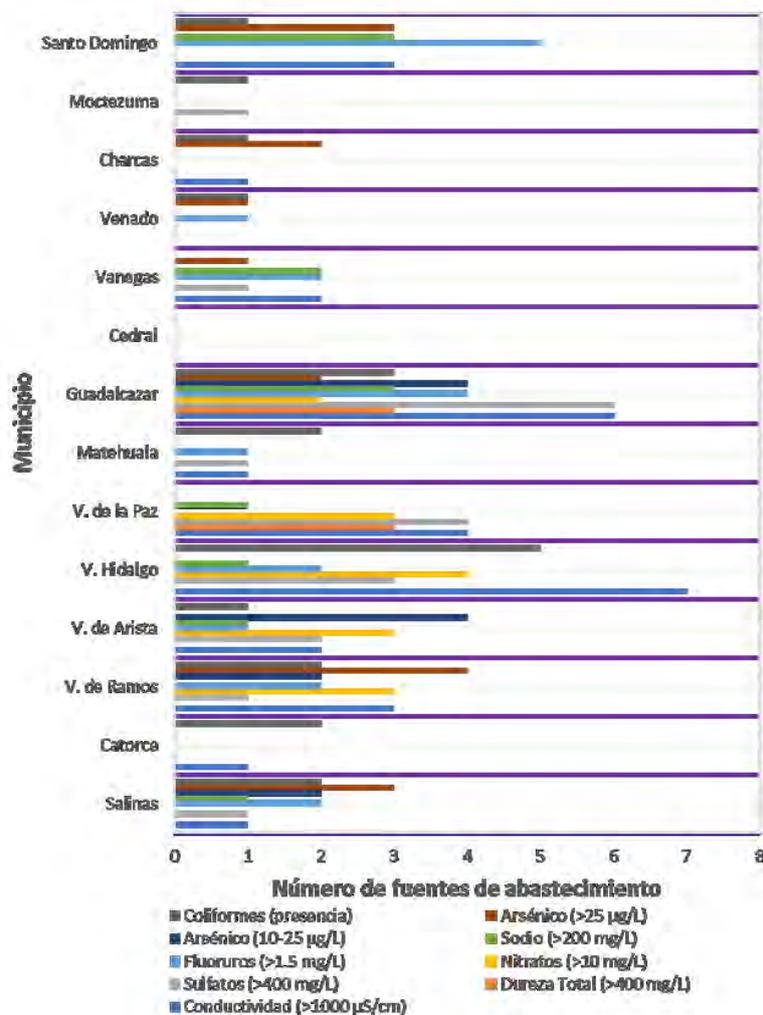


Figura 2. Distribución por municipio del número de muestras que presentaron alguno de los parámetros de la calidad del agua por encima de lo que marca la Norma Oficial Mexicana para agua de uso y consumo humano vigente (NOM-127 modificación año 2000) en la Región Altiplano. El total de muestras analizadas correspondió a n=74

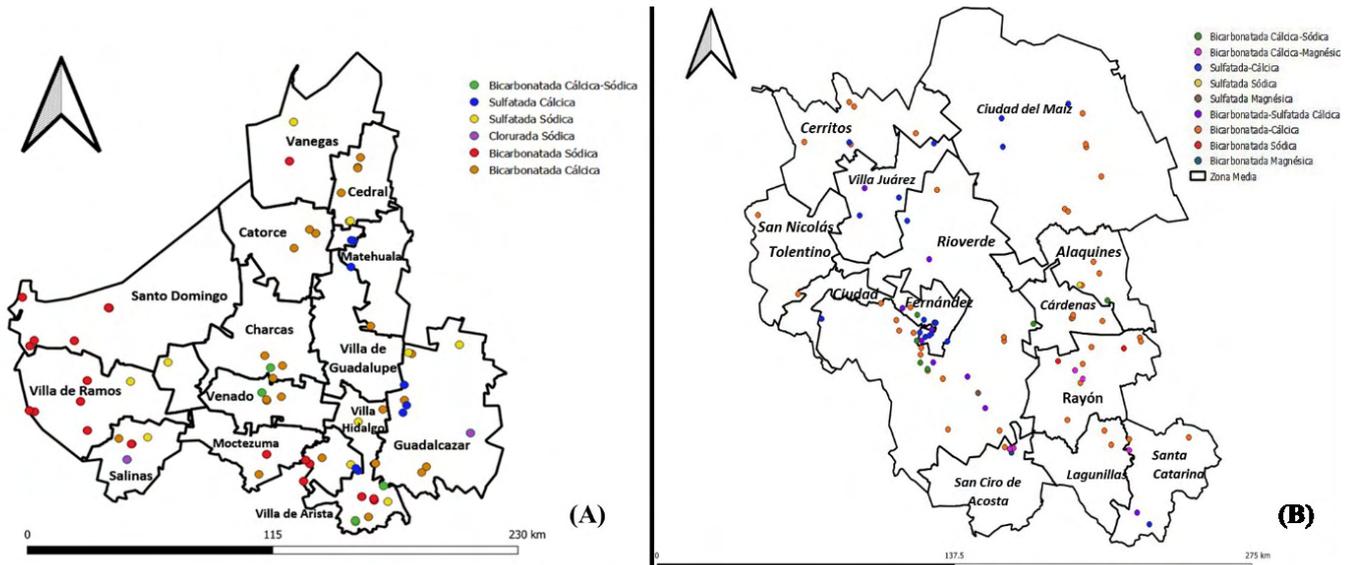


Figura 3. Familias de agua determinadas con base en la calidad del agua de los pozos en las localidades estudiadas en las Regiones Altiplano (A) y Zona Media (B)

Con respecto de la región Zona Media, el 63.2% de las fuentes de abastecimiento analizadas presentó al menos un parámetro de la calidad del agua fuera de la norma mexicana para agua potable (NOM-127); en el 12.6% de los abastecimientos presentaba concentraciones de arsénico superiores a lo que marca la guía para agua potable de la OMS (2011, 2017), un porcentaje menor a lo que se determinó en la región Altiplano.

## 5. DISCUSIÓN

Para entender las condiciones en que se lleva a cabo el abastecimiento de agua, es necesario entender como es la gestión del agua potable, proceso sumamente complejo ya que involucra una amplia gama de actores desde el nivel federal hasta el comunitario pasando por el nivel estatal y municipal (Tejeda-González, 2017; Soares, 2021). Así mismo, en la gestión del agua considerando un abastecimiento sostenible participan diferentes fuerzas motrices en las dimensiones social, económica, política, biofísica, de salud, cultural y legal-institucional de la gestión del agua, que afectan directa o indirectamente la disponibilidad, la accesibilidad al recurso y su calidad (Tejeda et al., 2018).

### 5.1 Accesibilidad física y económica

En lo concerniente a la disponibilidad del agua, a través de la recopilación de datos en campo, se

estableció un Estudio de Línea Base para cada región del estudio, lo que permitió analizar la incidencia de diferentes factores sociales, económicos, culturales, políticos, de salud y biofísicos (geología, relieve, y otros) sobre la disponibilidad del recurso. En esa complejidad se logró identificar que los factores de mayor relevancia y que han incidido en la disponibilidad del agua se relacionan con: (1) las relaciones intra e intercomunitarias, (2) las tarifas del agua, (3) la disponibilidad de infraestructura de almacenamiento y distribución, (4) la planeación, (5) la calidad del agua en la fuente, (6) el estado de la infraestructura (y su mantenimiento) y (7) la falta de medidores que la población percibe como “reparto inequitativo del recurso” en aquellas comunidades donde no hay equipo de medición (Tejeda-González, 2017; Salto-Quintana, 2020). En lo correspondiente a las relaciones intra e intercomunitarias, éstas se percibieron positivas debido a que las comunidades han logrado acuerdos para aprovechar mejor el recurso, por ejemplo, estableciendo principios básicos de entendimiento entre comunidades para el aprovechamiento del agua de una fuente común; por ejemplo, en la Región Altiplano, el organismo operador de la ciudad de Matehuala abastece a la cabecera municipal y algunas localidades del municipio de Villa de Guadalupe.

La distribución y el almacenamiento del agua se percibe como un asunto de alta preocupación ya que algunas veces no tienen los insumos y/o recursos para el mantenimiento de la infraestructura y muchas

veces las comunidades dependen más bien del suministro con pipas que provee la cabecera municipal (los casos de Ciudad del Maíz y Santa Catarina, en la Zona Media) o bien utilizan agua desde fuentes superficiales contaminadas como lo son bordos u ollas de agua. Esto es particularmente crítico en el Altiplano donde las fuentes de agua superficiales son temporales y escasas dadas las condiciones de la región. A diferencia del Altiplano, en la Zona Media se observó que existe muy poca planeación y gestión de agua a nivel de las comunidades o ante una autoridad, aun cuando su única fuente de agua pueda estar contaminada o se encuentre a algunos kilómetros de distancia; como ejemplo, la comunidad indígena de Santa María Acapulco en el municipio de Santa Catarina no tiene una fuente de agua y depende del suministro con pipas por parte de la cabecera municipal, cuando no reciben agua, la acarrean del Río Santa María, a una distancia de 2 km, y hasta 4 h (ida y vuelta). Así, para hacer frente a la falta de agua en sus viviendas, las personas van a buscarla a las fuentes por diferentes medios: utilizando sus camionetas, carretas, carretillas, o utilizando animales de carga. Esta situación es de mayor importancia en el Altiplano, y también ocurre en la Zona Media.

El análisis de la Accesibilidad Física y Accesibilidad Económica al agua se realizó con base en la información recopilada durante las visitas a las comunidades. En esta descripción no se incluye a las cabeceras municipales ya que cuentan con infraestructura física y operativa para el suministro de agua a la población.

La accesibilidad física supone que los servicios e instalaciones de agua deben estar al alcance de la población, en distancia y/o tiempo de desplazamiento, además de proveer de agua de calidad suficiente de acuerdo con lo que han establecido los organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (CESCR, Observación General No. 15, 2003; Albuquerque, 2014). En la Región Altiplano, los habitantes que no reciben agua entubada dentro del terreno de su vivienda tienen acceso a una fuente comunitaria, sin embargo, en la época de sequía es habitual que aquellas comunidades con limitado acceso al agua la compren en pipas a otras comunidades o bien soliciten este apoyo a la cabecera municipal. Las comunidades disponen de bordos u ollas de agua para el suministro a los animales o para otros usos dentro de la vivienda. Se reconoce que los factores que inciden en la disponibilidad física del recurso están

relacionados con las propias condiciones áridas de la región. Otro factor de importancia que incide en la disponibilidad de agua se relaciona con el otorgamiento de concesiones para la extracción de agua subterránea para uso agrícola que contabiliza por un 75%, según el Registro Público de Derechos del Agua de la CONAGUA (REPDA, 2021) en la Región Altiplano y por un 61.6% en la Zona Media. De acuerdo con las personas, no hay vigilancia sobre la extracción del volumen concesionado a la agricultura y podría ser mayor a lo reportado; esta situación podría incidir en una menor disponibilidad de agua para la población considerando que la extracción de agua para la agricultura es alta y que los pozos concesionados a la agricultura y aquellos para el abastecimiento con frecuencia se localizan en el mismo acuífero. De acuerdo con Martínez-Austria y Vargas-Hidalgo (2017), la Ley de Aguas Nacionales debe revisarse y el sistema de concesiones debe ser diferenciado ya que la forma en cómo actualmente se otorgan crea inequidades que obstaculizan el cumplimiento del derecho humano al agua.

La accesibilidad económica supone que el usuario paga un costo relacionado con el abastecimiento de agua en tal proporción que no compromete su acceso a otros servicios y su subsistencia (CESCR, Observación General No. 15, 2003; Albuquerque, 2014). Como se describió previamente, aunque se aplican diferentes tarifas por el servicio de agua, en general éstas son bajas, sin embargo, cuando los habitantes perciben mala calidad del agua que se le suministra, sea por su aspecto, olor, color y/o sabor, optan por comprar agua purificada para tomar y cocinar lo que representa un gasto considerable para acceder al agua que necesitan. Esta situación no es exclusiva a las regiones de estudio, ocurre en el país dado que como ya se ha señalado en otros trabajos, el suministro de agua corresponde a agua “entubada” y no es necesariamente potable (Vázquez-García y Sosa-Capistrán, 2017; Ibáñez y Lazo, 2020; Soares, 2021).

Un aspecto que se percibió muy positivo en la Zona Media es el esfuerzo de la población para instalar infraestructura para colecta de agua de lluvia a nivel comunitario (Villa Juárez) o a nivel de vivienda (Villa Juárez, Rayón, Santa Catarina). Los habitantes colectan hasta 10m<sup>3</sup> en la temporada de lluvias y de acuerdo con las personas, es agua de muy buen sabor, les es suficiente para varios meses y la utilizan para beber y cocinar. Un aspecto que la población consideró negativo es que la baja disponibilidad de

agua en algunas comunidades rurales del Altiplano (Villa de Guadalupe) y de la Zona Media (Ciudad del Maíz, Rioverde y Santa Catarina) les hace completamente dependientes del suministro a partir de fuentes de agua que se localizan en otro municipio o en la cabecera municipal dependiendo muchas veces del suministro con pipas. Sin desacreditar su sentir, los acuerdos entre comunidades o entre municipios para resolver su problema de falta de agua demuestra una fortaleza en donde los habitantes tienen una activa participación para asegurar su propio acceso al agua. Casos documentados a este respecto han sido reportados para América Latina y México (Silva et al. 2015; Galindo y Palerm, 2016; Romano et al. 2021). Tomando como ejemplo la situación en Honduras, Costa Rica y Nicaragua, Romano y col. (2021) indican que, en América Latina, el Estado ha empezado a prestar mayor atención al medio rural, aunque reconocen que el acceso mejorado al agua ha sido asegurado por los propios residentes quienes realizan la gestión del agua ante varias instancias. De acuerdo con Silva y col. (2015) esto ha estado también ocurriendo en México, aunque esta forma de gestión no ha sido objeto de reconocimiento, posiblemente por la estructura gubernamental centralizada de nuestro país. En este trabajo se describe que los comités ejidales, los comités o juntas de agua y los responsables locales participan en la gestión del agua para su comunidad. Es necesario reconocer que, aunque los responsables del agua tienen poca capacitación en los procesos de gestión (y las normativas vigentes en materia de agua), acuden a la instancia que consideran les puede apoyar a resolver su problema de agua. El fortalecimiento de los comités y/o juntas de agua y comités ejidales con una adecuada capacitación sería un acierto para lograr una mayor y mejor cobertura de agua (en cantidad y calidad, de forma equitativa) fortaleciendo así la gestión comunitaria como una alternativa para suministrar servicios de agua y saneamiento, en las zonas rurales como ya ha sido previamente resaltado por Silva y col. (2015), Galindo y Palerm (2016). De acuerdo con los autores, lo anterior implica mayor coordinación entre los tres niveles de gobierno (municipal, estatal, federal) y reformas al marco legal para reconocer y regular este tipo de gestión en el país, en la que los recursos públicos se ejercen en la ejecución de planes consensuados en torno a metas nacionales, pero dejando a las organizaciones comunitarias la autonomía en la toma de decisiones respecto al acceso equitativo para uso personal y concesiones condicionadas de acuerdo a la

disponibilidad ecológica y prioridad de uso (Martínez-Austria y Vargas-Hidalgo, 2017).

### *5.2 Calidad del agua*

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) buscan lograr el acceso universal al agua gestionada de forma segura, lo que requiere que una fuente mejorada esté ubicada en las instalaciones, disponible cuando sea necesario y libre de contaminación (Adams y Smiley, 2018; WHO/UNICEF, 2019). El problema es si en la realidad la población tiene acceso a fuentes mejoradas de agua como lo marcan las cifras oficiales (Martínez-Santos, 2017). De acuerdo con la ONU-Agua y la Organización Mundial de la Salud “las fuentes mejoradas de agua potable son aquellas que tienen el potencial de suministrar agua segura por la naturaleza de su diseño y construcción, e incluyen agua entubada, perforaciones o pozos entubados, pozos excavados protegidos, manantiales protegidos, agua de lluvia y agua envasada o distribuida”; además, el agua potable se considera “administrada de manera segura cuando las personas utilizan una fuente mejorada de agua potable que es accesible en las instalaciones, disponible cuando se necesita y libre de contaminación” (WHO/UNICEF, 2019). En este contexto, varios autores han analizado el acceso de la población a fuentes de agua segura concluyendo que más allá de la asequibilidad y la accesibilidad, está la calidad del agua en aspectos tan fundamentales como que esté libre de contaminación bacteriológica y de ser posible, química, que no se cumple completamente en las zonas rurales e incluso en algunas zonas urbanas (Martínez-Santos, 2017; Vázquez-García y Sosa-Capistrán, 2017; Hollas et al., 2019; Bain et al., 2020; Galezzo y Rodríguez, 2021; Soares, 2021).

Bajo el criterio del acceso a fuentes mejoradas de agua, se puede resaltar que si bien, la población en las localidades estudiadas principalmente tiene acceso a agua de pozos entubados y protegidos, la calidad química no es adecuada como se puntualiza en las tablas 1-2 y figuras 2-4 de este documento. La estrategia de distribución más comúnmente empleada es bombear el agua del pozo a una pileta donde se desinfecta por cloración y desde donde se distribuye a la población por gravedad. Esta operación incrementa la posibilidad de que el agua se contamine bacteriológicamente durante el propio proceso de distribución cuando las piletas no tienen tapa y no se aplica el proceso de desinfección, como se pudo observar en varias localidades. De esta

forma, aunque la población en teoría tendría acceso a una fuente mejorada de agua, ésta “no es segura”; las fuentes de agua como manantiales no protegidos, arroyos o ríos, bordos y ollas de agua no se consideran fuentes mejoradas, ni siquiera debería considerarse que contribuyen al suministro “básico” mientras no sean manejadas (protegidas, el agua sea potabilizada, conectadas a una red de distribución) de forma segura.

En lo relativo a la calidad fisicoquímica del agua (tablas 1-2, figuras 2-4), los datos muestran que, en los municipios de las dos regiones estudiadas, existen comunidades que no reciben agua con la calidad para uso y consumo humano, si se compara su calidad con lo que establece la OMS y la normativa nacional. En las localidades visitadas no se aplica ningún proceso de potabilización para eliminar sustancias tóxicas como arsénico, plomo y fluoruro o reducir el nivel de sales de forma que se puede afirmar que las localidades visitadas, donde así ocurre, reciben “agua entubada” y no agua potable, lo cual es congruente con lo reportado por otros autores para otras localidades en México (Vázquez-García y Sosa-Capistrán, 2017; Ibáñez y Lazo, 2018; Soares, 2021). El suministro de agua que no es apropiada para el consumo humano ha sido reportado para otras localidades en México y en otros países como Brazil, Costa Rica, Colombia entre otros (Mena-Rivera et al., 2018; Hollas et al., 2019; Galezzo y Rodríguez, 2021). Bain y colaboradores (2020) indican que, a nivel mundial, los contaminantes más comúnmente encontrados en el agua para consumo humano son bacterias, arsénico y fluoruro de tal manera que esto compromete el cumplimiento del ODS 6.1 y del derecho humano al agua.

En México, varios reportes han descrito la problemática de la contaminación por arsénico y fluoruro en agua de pozos que se utilizan para el abastecimiento a la población afectando a localidades en veintitrés Estados, entre ellos, San Luis Potosí, con el consecuente riesgo a la salud (Banning et al., 2012; Estrada-Capetillo et al., 2014; Cardona et al., 2018; Limón-Pacheco et al., 2018; Armienta et al., 2021). Posiblemente como resultado de las campañas de salud en el Estado, la población manifiesta consumir agua purificada (de garrafón) para beber, aunque reconocen utilizar el agua de las fuentes de abastecimiento al menos para cocinar, bañarse, lavar y otras tareas en la vivienda. Al final, la población paga para tener agua para beber y cocinar a un costo que no todas las personas pueden cubrir.

### *5.3 Estadísticas nacionales del suministro de agua*

En el año 2020 se llevó a cabo el Censo de Población y Vivienda que se realiza a través del INEGI cada 5 años. A partir de su base de datos, se generó la información que se muestra en la Tabla 3, para el Estado de San Luis Potosí. Se estimó la población total en la Región, la que vive en las Cabeceras Municipales, en las comunidades entre 500 y 2500 habitantes o en comunidades menores a 500 habitantes. Por cada grupo de población, se estimó el porcentaje de viviendas que reciben agua entubada en el terreno de la propia vivienda, las viviendas que no reciben agua entubada y que deben colectarla de fuentes de abastecimiento comunitarias con los medios a su alcance; se registró también la cobertura de drenaje como el porcentaje de viviendas con este servicio público.

Cabe destacar que el suministro de agua entubada no significa agua que ha sido potabilizada (Soares, 2021); de acuerdo con el Censo 2020, la población que recibe agua suministrada por un servicio público, se entiende agua potable, es del orden de 46.6% en el Altiplano y 58% en la Zona Media teniendo mayor peso en estos porcentajes, la cobertura de agua a las cabeceras municipales.

La información que muestra la Tabla 3 es informativa sobre la situación del abastecimiento de agua en dos Regiones del Estado de San Luis Potosí que podrían ser un reflejo de la situación Estatal. De los datos resaltan algunas observaciones:

1. La cobertura de agua es inferior al promedio estatal (valor afectado por la cobertura de agua en las dos ciudades más grandes del estado y que no se localizan en las Regiones en estudio) y al promedio nacional descrito previamente.
2. Dos regiones con marcada diferencia en cuanto a su extensión, pero con coberturas de agua más o menos similar, si comparamos los valores promedio.
3. Diferencia notable en cuanto a la cobertura de agua en los diferentes municipios (notar los valores de los rangos) si lo analizamos por región y por tamaño de las comunidades en contraste con las cabeceras municipales. Es evidente que se requiere mayor igualdad en el suministro de agua entre la población urbana y rural. Como apunta Silva (2016) son años de incertidumbre en relación con la responsabilidad por el abastecimiento de

agua, y hay grandes diferencias geográficas en el país, pero es una problemática que se debe atender en el corto plazo.

4. Un porcentaje de viviendas que no reciben agua entubada mayor al promedio estatal.
5. Un riesgo latente de contaminación bacteriológica cuando vemos la cobertura de drenaje en las comunidades rurales ya que la cobertura de drenaje no significa que exista infraestructura de tratamiento de aguas residuales.

aunque en las viviendas se cuenta al menos con letrina o un hoyo que hace las funciones de un sanitario. Es posible que en el Censo 2020, se haya considerado esta condición para indicar la cobertura de drenaje. Seis municipios de la Zona Media cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, en las cabeceras municipales. Aunque no se tienen datos actuales de la situación en el Altiplano, a través del trabajo de campo se pudo constatar una condición similar e incluso mayor dificultad para mantener la higiene de las instalaciones sanitarias, por la falta de agua.

En la Zona Media, por ejemplo, no se encontró infraestructura de drenaje en las comunidades,

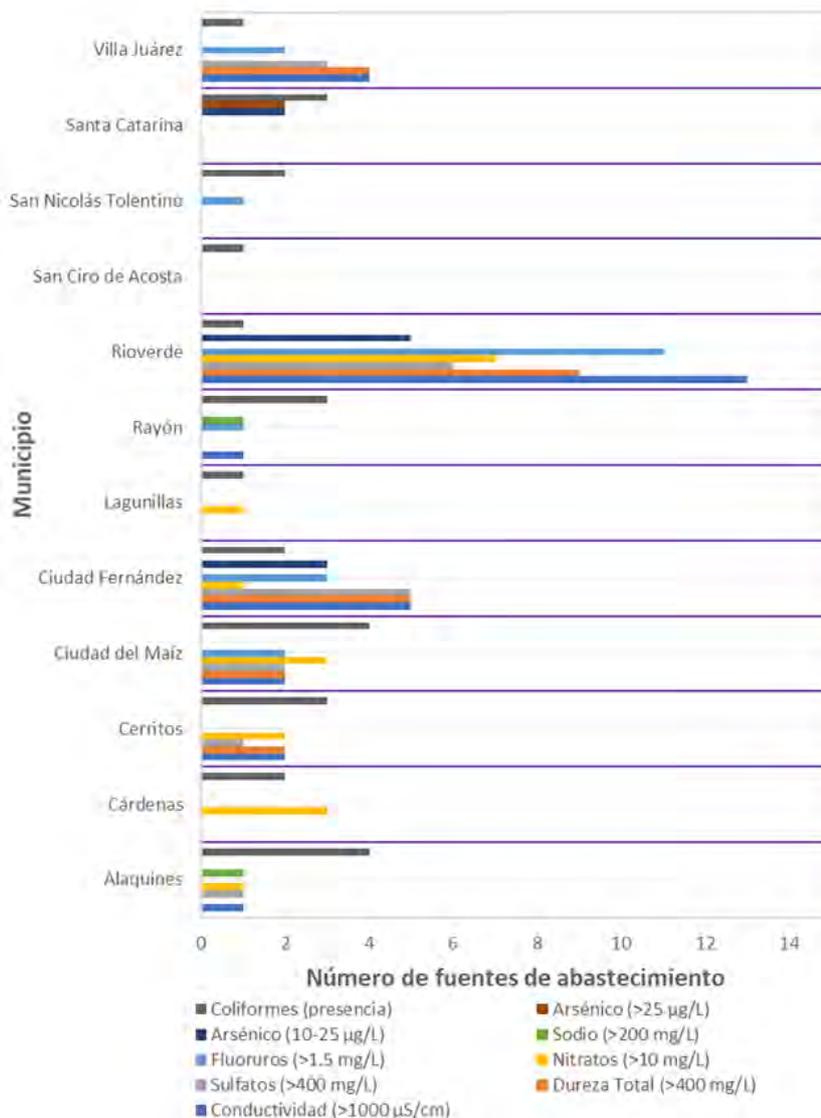


Figura 4. Distribución por municipio del número de muestras que presentaron alguno de los parámetros de la calidad del agua por encima de lo que marca la Norma Oficial Mexicana para agua de uso y consumo humano vigente (NOM-127 modificación año 2000) en la Región Zona Media. El total de muestras analizadas correspondió a n=95

Tabla 3. Población en las Regiones Altiplano y Media del Estado de San Luis Potosí, así como la cobertura de agua y drenaje obtenidos a partir del Censo Nacional de Población (INEGI, 2020)

Región del Estado	Población total (número de habitantes)	% Viviendas con agua entubada en el ámbito de la vivienda (rango)	% Viviendas que no disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda (rango)	% Viviendas con servicios de drenaje (rango)
<b>ALTIPLANO</b> / Población Total	346904	85.5 (49.5-97.9)	14.3 (2.0-49.9)	86.3 (62.3-96.5)
En las cabeceras municipales	48.5%	98.1 (95.9-99.9)	1.6 (0.1-4.7)	96.2 (83.3-99.9)
500 a 2500 habitantes	22.6%	82.7 (51.8-99.5)	10.4 (1.6-47.4)	75.1 (26.3-97.2)
<500 habitantes	28.8%	73.1 (35.5-96.5)	26.1 (3.5-64.0)	78.7 (54.1-94.0)
<b>MEDIA</b> / Población Total	282761	85.9 (51.4-98.3)	13.8 (1.6-48.4)	80.1 (40.1-95.9)
En las cabeceras municipales	55.2%	92.8 (47.6-99.1)	6.5 (0.7-52.4)	89.7 (71.4-98.6)
500 a 2500 habitantes	21.2%	75.7 (53.7-98.4)	15.7 (1.5-46.2)	61.9 (24.8-96.4)
<500 habitantes	23.5%	76.0 (50.4-93.1)	23.8 (6.8-49.3)	73.6 (46.0-94.7)
<b>ESTATAL</b> / Población Total	2822255	92.4	7.4	90.6

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo se realizó con el propósito de identificar las condiciones del abastecimiento de agua en el área rural, conocer si es conforme a lo que indica el Derecho Humano al Agua (accesible, asequible y de calidad) y aportar información a los tomadores de decisiones involucrados en el servicio de agua. Los resultados obtenidos refuerzan el hecho que el Derecho Humano al Agua en el área rural no se cumple a cabalidad, la situación en dos regiones del Estado de San Luis Potosí son un ejemplo; tan solo en la calidad del agua, 77.9% en el Altiplano y 63.2% en la Zona Media presentan algún grado de contaminación. Se entiende que la situación en el área rural, en otros estados en el país podría ser mejor de acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda 2020, sin embargo, otros casos en el país con problemas similares han sido descritos en la literatura. De acuerdo a lo observado en las regiones estudiadas, existe aún un rezago importante para lograr alcanzar los indicadores del objetivo ODS-6.1.1 en el 2030 porque si bien en la mayoría de las comunidades rurales hay una disponibilidad y accesibilidad a fuentes de agua en condiciones más o menos aceptables, ya sea porque se recibe agua en la casa o existe una fuente de abastecimiento cercana, no son fuentes mejoradas y no se suministra “agua segura” como lo establecen los organismos internacionales (OMS, ONU-Agua) ya que se incumple en los aspectos de calidad del recurso que no se potabiliza y en menos del 25% de las fuentes de

abastecimiento visitadas, el agua se desinfectaba. En el tema de asequibilidad, en las comunidades rurales existe una diferencia en las tarifas de agua, en lo general no cuentan con medidores del líquido, hay morosidad en los pagos por el servicio, lo que lleva a recaudar recursos insuficientes para el abastecimiento sostenible de agua. De acuerdo con la literatura citada, esta situación no es propia de las regiones del estado de San Luis Potosí por lo que para lograr la cobertura de agua como lo concibe el Derecho Humano al Agua se requiere impulsar las políticas, planes y programas necesarios que incluyan a las comunidades rurales de forma que accedan a los servicios básicos de agua (y saneamiento) y una mayor participación del estado como está sucediendo en otros países de América Latina en donde se ha fortalecido a las organizaciones comunitarias rurales para lograr el acceso a fuentes mejoradas de agua (Romano et al., 2021). El fortalecimiento de las organizaciones comunitarias (comités ejidales, comités o juntas de agua y otros) con apoyo técnico, económico, de capacitación, y su reconocimiento en el marco legal sería un acierto ya que están contribuyendo activamente al logro de la cobertura de agua en el país.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado a través del Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología (COPOCYT) para los proyectos FOMIX FMSLP-2012-C01-194085 y CEEPAC Fideicomiso 18397.

## REFERENCIAS

- Adams, E. A., & Smiley S.L. (2018). Urban-rural water access inequalities in Malawi: implications for monitoring the Sustainable Development Goals. *Natural Resources Forum*, 42, 217–226. DOI: 10.1111/1477-8947.12150
- Albuquerque, C. D. (2014). Informe de la relatora especial sobre el derecho humano al agua potable y el saneamiento (A/HRC/27/55/Add. 1). Ginebra, Suiza: Consejo de Derechos Humanos de las Naciones Unidas. <https://www.refworld.org/es/docid/53eb42bf4.html> [Consultado el 4 de enero de 2022]
- APHA/AWWA/WEF (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd Ed. American Public Health Association, Washington, DC, USA.
- Armienta, M.A., Cardona, A., Labastida, I., Alfaro de la Torre, M.C., & Ballinas Casarrubias, M. L. (2021). Situación de la presencia de arsénico y fluoruro en aguas subterráneas en México. En: *Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México*. 1ª Ed. Ciudad de México, UNAM-Instituto de Geofísica: Hacia el cumplimiento del derecho humano al agua 200, pp.: ISBN 978-607-30-4773-9. <https://agua.org.mx/biblioteca/arsenico-y-fluoruro-en-agua-riesgos-y-perspectivas-desde-la-sociedad-civil-y-la-academia-en-mexico-unam/> [Consultado el 17 de diciembre de 2021]
- Asamblea General de Naciones Unidas (AG-ONU), Resolución: El derecho humano al agua y el saneamiento, 2010 (A/RES/64/292). <https://www.refworld.org/cgi-bin/texis/vtx/rwmain/opendocpdf.pdf?reldoc=y&docid=4cc9270b2> [Consultado el 2 de agosto de 2021]
- Bain, R., Johnston, R., & Slaymaker, T. (2020). Drinking water quality and the SDGs. *npj Clean Water*, 3:37. DOI: 10.1038/s41545-020-00085-z
- Banning A., Cardona A., & Rude T.R. (2012) Uranium and arsenic dynamics in volcano-sedimentary basins –an exemplary study in north-central Mexico. *Applied Geochemistry*, 27, 2160–2172 ISSN: 0883-2927, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.01.001
- Cardona A., Banning A., Carrillo-Rivera J.J., Aguillón-Robles A., Rude T.R., & Aceves-de-Alba J. (2018). Natural controls validation for handling elevated fluoride concentrations in extraction activated Tóthian groundwater flow systems: San Luis Potosí, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(121), 1-13. DOI: 10.1007/s12665-018-7273-1
- Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de las Naciones Unidas (CESCR). Observación General nº 15. 2003 <https://www.escri-net.org/es/recursos/observacion-general-no-15-derecho-al-agua-articulos-11-y-12-del-pacto-internacional> [Consultado el 2 de agosto de 2021]
- CONAGUA (2017). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México. [Consultado el 10 de septiembre de 2021]. Disponible en: [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2017.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf)
- CONAGUA-UJED (2013). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía (PMPMS) en el Consejo de Cuenca del Altiplano. Convenio de Colaboración Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED) CNA-SGT-GIABA-UJED/2013. [Consultado el 10 de septiembre de 2021]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99911/PMPMS\\_CC\\_Altiplano\\_R.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99911/PMPMS_CC_Altiplano_R.pdf)
- Domínguez, J., Martínez, D., Palacios, A., & Peña, A. (2013). El monitoreo social del derecho humano al agua y saneamiento. El Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales. Instituto de Desarrollo Social. ISBN 978-607-462-474-8
- Estrada-Capetillo, B.L., Ortiz-Pérez, M.D., Salgado-Bustamante, M., Calderón-Aranda, E., Rodríguez-Pinal, C.J., Reynaga-Hernández, E.R., Corral-Fernández, N.E., González-Amaro, R., & Portales-Pérez, D.P. (2014). Arsenic and fluoride co-exposure affects the expression of apoptotic and inflammatory genes and proteins in mononuclear cells from children. *Mutation Research*, 761, 27–34. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2014.01.006

- Galindo, E., & Palerm, J. (2016). Sistemas de agua potable rurales. Instituciones, organizaciones, gobierno, administración y legitimidad. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(2), 17-34.
- Galezzo, M.A., & Rodríguez Susa, M. (2021) The challenges of monitoring and controlling drinking -water quality in dispersed rural areas: a case study based on two settlements in the Colombian Caribbean. *Environmental Monitoring Assessment*, 193, 373. DOI: 10.1007/s10661-021-09138-3
- García Romero, E. (2020). Estudio sobre la disponibilidad y calidad del agua en la Zona Media de San Luis Potosí bajo el marco de la Agenda 2030. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Hernández Cortés, M.V., Padilla Díaz, J., & Pérez Cabrera, J.M. (2019). Análisis de la Disponibilidad hídrica en la Región Centro, Media y Huasteca del Estado de San Luis Potosí mediante datos del Registro Público de Derechos del Agua. Tesis de la licenciatura en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima.
- Hollas, C.E., Pokrywiecki, T.S., do Prado, N. V., Chini, A., Düsman, E., & da Conceição, P.S. (2019). Water quality for rural home supplying in the south of Brazil. *Acta Scientiarum*, 41, e43266. DOI: 10.4025/actascibiols.v41i1.43266
- Ibañez, O., & Lazo, J. (2018). El derecho humano al agua para excluidos en los municipios de Juárez y Guachochi, Chihuahua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(4), 75-109. DOI:10.24850/j-tyca-2018-04-04.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Panorama sociodemográfico de San Luis Potosí, 2015. [Consultado el 12 de agosto de 2021]. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estr uc/inter\\_censal/panorama/702825082345.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estr uc/inter_censal/panorama/702825082345.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censo de Población y Vivienda 2020. [Consultado el 6 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html>
- Limón-Pacheco, J.H., Jiménez-Córdova, M.I., Cárdenas-González, M., Sánchez-Retana, I.M., Gonsebatt, M.E., & Del Razo, L.M. (2018). Potential Coexposure to arsenic and fluoride and biomonitoring equivalents for Mexican children. *Annals of Global Health*, 84, 257-273. DOI: 10.29024/ogh.913
- Liverman, D. (2018). Geographic perspectives on development goals: Constructive engagements and critical perspectives on the MDGs and the SDGs. *Dialogues in Human Geography*, 8(2), 168–185. DOI: 10.1177/2043820618780787
- Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (2017). Sistema de asignaciones, concesiones y política hídrica en México. Efectos en el derecho humano al agua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII (5), 117-125. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-05-08
- Martínez-Santos, P. (2017) Does 91% of the world’s population really have “sustainable access to safe drinking water”?, *International Journal of Water Resources Development*, 33(4), 514-533. DOI: 10.1080/07900627.2017.1298517
- Mena-Rivera, L., & Quirós-Vega, J. (2018). Assessment of drinking water suitability in low-income rural areas. *Journal of Water and Health*, 16(3), 403-413. DOI: 10.2166/wh.2018.203
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Modificación Año 2000. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000)
- Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud Ambiental. Agua para Uso y Consumo Humano. Requisitos Sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos Sanitarios para el Muestreo. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/230ssa102.html>
- OMS/WHO (2011). Guidelines for Drinking Water Quality, 4th Ed. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

- OMS/WHO (2017). Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. Desarrollo Sostenible (online). [Consultado el 2 de agosto de 2021]. Disponible en: <https://sdgs.un.org/es/goals>
- Registro Público de Derechos del Agua (REPDA-CONAGUA, 2021) (online). Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua>
- Romano, S. T., Nelson-Núñez, J., & LaVanchy, G. T. (2021). Rural water provision at the state-society interface in Latin America. *Water International*, s/n Link: <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1928973>
- Salto Quintana, F. (2020). Marco de influencia de la evaluación ambiental estratégica en el proyecto de gestión del agua en Zona Media de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Silva, J. A. (2016). Rural Water Supply in Mexico. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(78), 123-141. DOI: 10.11144/Javeriana.cdr13-78.rwsm
- Silva Rodríguez de San Miguel, J. A., Trujillo Flores, M.M., Lámbarry Vilchis, F., Rivas Tovar, L.A., & Bernal Pedraza, A. Y. (2015). Community Water Management in Latin America and the Caribbean: Challenges for Mexico. *Journal of Sustainable Development*, 8(3), 102-112. DOI: 10.5539/jsd.v8n3p102
- Soares, D. (2021). El agua en zonas rurales de México. *EntreDiversidades. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 8(2), 191–211. DOI: 10.31644/ED.V8.N2.2021.A09
- Tejeda-González, J.C. (2017). Propuesta metodológica basada en la evaluación ambiental estratégica para la planificación del aprovechamiento sustentable del agua y los recursos naturales en zonas marginadas y con potencial de desarrollo. Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Tejeda González, J.C., Mendezcarlo Silva, V., Alfaro de la Torre, M.C., & Medellín Milán, P. (2018). Requerimientos para la implementación del derecho humano al agua y al saneamiento en México: caso de estudio en el altiplano potosino. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, 11(21), 111-144. ISSN: 2007-1531.
- UN-GLASS (2019). National systems to support drinking-water, sanitation and hygiene: global status report 2019. UN-Water global analysis and assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS) 2019 report. Geneva: World Health Organization. ISBN: 978-92-4-151629-7
- UN-SDGS (2020). The Sustainable Development Goals Report 2020 (online). [Consultado el 3 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://unstats.un.org/sdgs>
- Valdés de Hoyos, E. I. P., & Uribe Arzate, E. (2016). El derecho humano al agua. Una cuestión de interpretación o de reconocimiento. *Cuestiones Constitucionales*, 34, 3-25. ISSN 1405-9193.
- Vázquez-García, V., & Sosa-Capistrán, D.M. (2017). Sin agua no vivo: género y derecho humano al agua en el municipio de La Antigua, Veracruz. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 14(3), 405-425.
- Weststrate, J., Dijkstra, G., Eshuis, J., Gianoli, A., & Rusca, M. (2019). The Sustainable Development Goal on Water and Sanitation: Learning from the Millennium Development Goals. *Social Indicators Research*, 143, 795–810. DOI: 10.1007/s11205-018-1965-5
- WHO/UNICEF (2019). Joint monitoring programme 2019 update report. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities. New York. ISBN: 978-92-415-1623-5

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

Cuadro S1. Organismos responsables de la administración y abastecimiento del agua en los municipios de las Regiones Altiplano y Zona Media del Estado de San Luis Potosí.

Municipio	No. de localidades rurales visitadas (Fuentes de abastecimiento analizadas)	Administración del agua		Tarifas	
		Cabecera municipal	Localidades rurales		
<b>REGIÓN ALTIPLANO</b>					
<b>Catorce*</b>	2 (5)	Dirección de Obras Públicas	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua	Las cuotas se establecen principalmente con base a las tarifas establecidas para el consumo de energía eléctrica para servicio público de bombeo de agua potable, de forma que los usuarios pagaban entre \$20 y \$100 pesos por mes. Al no existir medidores, se estima que los usuarios recibían entre 6 y 10 m <sup>3</sup> al mes. Existe tandeo: cada tercer día, cada 3 días o 2 veces por semana. Dificultades serías para costear el mantenimiento de la infraestructura. Algunas localidades (8/53) dependen del suministro de agua a través de la cabecera municipal.	
<b>Cedral</b>	3 (4)	Organismo Operador: Organismo Paramunicipal de Agua, Drenaje y Saneamiento; Desarrollo Rural	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Charcas*</b>	2 (4)	Organismo Operador: Servicios de Agua Potable y Saneamiento de Charcas	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Guadalcázar*</b>	10 (13)	Desarrollo Social	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Matchuala</b>	2 (2)	Organismo Operador: Servicios de Agua Potable, Alcantarillado, y Saneamiento de Matchuala	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Moctezuma</b>	2 (2)	Departamento de Agua Potable	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Salinas</b>	4 (5)	Departamento de Agua Potable	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Santo Domingo</b>	5 (6)	Secretaria General del Ayuntamiento	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Vanegas</b>	2 (2)	Organismo Operador de Vanegas	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Venado*</b>	2 (4)	Junta Municipal de Agua Potable	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Villa de Guadalupe</b>	Ninguna >500 habitantes	Departamento de Agua Potable	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		Idem
<b>Villa de Ramos</b>	6 (8)	Secretaría General del Ayuntamiento	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		
<b>Villa Hidalgo</b>	8 (11)	Departamento de Agua Potable	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua		

Municipio	No. de localidades rurales visitadas (Fuentes de abastecimiento analizadas)	Administración del agua		Tarifas
		Cabecera municipal	Localidades rurales	
Villa de Arista*	5 (7)	Organismo Operador de Agua Potable de Villa de Arista	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua	
Villa de la Paz*	Ninguna >500 habitantes (4)	Organismo Operador de Agua Potable de Villa de la Paz	Sistema de Organización Ejidal / Comité de agua	
<b>REGIÓN ZONA MEDIA</b>				
Alaquines*	4 (6)	Dirección de Agua Potable	Comité de Agua o Junta de Agua	\$40-50/mes, tandeo (cada 3 días o cada tercer día o 1h/d)
Cerritos*	3 (7)	Organismo Operador: Organismo Paramunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Cerritos	Comité de Agua	\$40-65/mes, 8 a 10m <sup>3</sup> , tandeo (reciben agua 2-4 h/d o 2 d/sem y en la cabecera municipal 5 d/sem)
Ciudad del Maíz*	6 (9)	Organismo Operador: Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento	Comité o junta de agua, responsable del agua, Comité ejidal con un responsable del agua. El organismo operador abastece algunas localidades rurales.	\$30-60/mes (\$79/mes en la cabecera municipal), 10 m <sup>3</sup> . Desde la cabecera municipal se suministra agua con pipas si la localidad no cuenta con una fuente de abastecimiento. Dos localidades acceden a un manantial desde donde la población acarrea el agua por sus propios medios. Algunas localidades con agua muy salina (Palomas, La Libertad) solo consumen agua purificada (\$15/garrafón). Existe tandeo.
Ciudad Fernández*	9 (11)	Dos organismos: Organismo Operador del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Ciudad Fernández; Organismo Operador Paramunicipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de El Refugio	Comité de agua, o bien, el organismo operador abastece y la localidad cuenta con un responsable de la distribución	\$30-80/mes (\$92/mes en la cabecera municipal). Tandeo (4 y hasta 10h/d o 3 d/sem o cada 3 días; sectorizado). Algunas localidades tienen medidores.

Municipio	No. de localidades rurales visitadas (Fuentes de abastecimiento analizadas)	Administración del agua		Tarifas
		Cabecera municipal	Localidades rurales	
Lagunillas	2 (2)	Departamento de Agua Potable	Comisariado ejidal o un responsable del agua	\$40-63/mes; 3 d/sem o cada 3 días. El pozo que surte la cabecera municipal se ubica en una localidad rural lejana.
Rioverde*	26 (29)	Organismo Operador: Organismo Operador Paramunicipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Descentralizado de las Autoridades del Ayuntamiento de Rioverde	Pocero o un responsable para el cobro de tarifas cuando el organismo operador abastece a la localidad. Comité de agua, comité ejidal. Una localidad recibe agua mediante pipas suministradas por Desarrollo Rural Municipal.	\$107/mes tarifa fija para las localidades suministradas por el organismo operador, \$30-80/mes en las demás localidades. Localidades sin una fuente de agua: \$5/m <sup>3</sup> o \$43/mes con derecho a un tambor de agua por cada vez (Desarrollo Rural). Tandeo: 3h/d o cada tercer día o cada 3 días o 1 d/sem.
San Ciro de Acosta*	Ninguna >500 habitantes (3)	Organismo Operador: Dirección de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de San Ciro de Acosta	No tiene localidades rurales de >500 habitantes	\$55/mes, no tiene programa de tandeo
Santa Catarina*	5 (7)	Cuenta con una Oficina del Agua, aunque no está plasmada en su organigrama administrativo	El 78% de su población es indígena de lengua Pame. Se visitaron 5 localidades y solo una cuenta con Comité de Agua. El suministro de agua depende de la cabecera municipal o de la fuente de agua disponible: manantial, agua del Río Santa María o agua de lluvia.	La cabecera municipal aplica una tarifa de \$20/año para mantenimiento. Donde hay una fuente de abastecimiento, las personas acarrear el agua por sus propios medios. Una localidad tiene un Comité de Agua y una tarifa de \$30/mes.
Rayón*	5 (10)	Organismo Operador: Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Descentralizado del Ayuntamiento de Rayón	Comité o junta de agua o el Comité ejidal a través del comisariado ejidal.	\$30 - 100/mes (\$74/mes en la cabecera municipal que cuenta con medidores). Una localidad cobra \$25/mes + \$10/m <sup>3</sup> adicional. Tandeo: 1 h/d o cada tercer día donde está sectorizado. Una localidad se abastece de un manantial y acarrea el agua por sus propios medios; una localidad no tiene pozo, compra el agua por pipas a la cabecera municipal y tiene colecta de agua de lluvia.

Municipio	No. de localidades rurales visitadas (Fuentes de abastecimiento analizadas)	Administración del agua		Tarifas
		Cabecera municipal	Localidades rurales	
<b>Cárdenas*</b>	1 (5)	Organismo Operador: Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cárdenas	El organismo operador administra el recurso suministrado a la única localidad con más de 500 habitantes	\$50/mes (10 m <sup>3</sup> ) y \$15/m <sup>3</sup> adicional. Tandeo: cada 3 días a la localidad rural.
<b>Villa Juárez*</b>	3 (4)	Departamento de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento	Comité de agua	\$50-60/mes (\$52 en la cabecera municipal). Tandeo: 5h/d o un día por sector. Existe acarreo de agua por sus propios medios desde la pileta de la localidad (una localidad)
<b>San Nicolás Tolentino*</b>	1 (2)	Departamento de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento	Comité de agua	\$10/m <sup>3</sup> en la cabecera municipal y \$50/mes en la localidad rural estudiada. Tandeo: 3 h/d o cada tercer día.

\*Se tomaron muestras de agua de las fuentes de abastecimiento a la cabecera municipal y se determinó su calidad.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license



## Comparación de precipitaciones diarias máximas anuales medidas en forma discreta y continua en zonas del centro sur de Chile

*Comparison of annual maximum daily rainfall measured in a discrete and continuous way in areas of south-central Chile*

Esteban Andrés Celis Recabal <sup>1\*</sup>

Recibido: 21/09/2021

Aceptado: 17/12/2022

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Este estudio se realizó con el fin de analizar si existen diferencias significativas entre mediciones de precipitación en 24 horas, realizadas con lapsos discretos (de 8 AM a 8 AM), y lapsos continuos de 24 horas. Para esto se trabajó con datos de 7 estaciones pluviográficas ubicadas en la Región del Maule, zona central de Chile (Potrero Grande, Pencahue, Talca, Colorado, Melozal, Parral y Bullileo Embalse) de las cuales se obtuvieron precipitaciones máximas anuales en lapsos continuos y discretos. Se obtuvo información de registros continuos y discretos con longitudes de datos variables (entre 28 y 39 años). Ambos registros se sometieron a análisis estadísticos con medidas de tendencia central y dispersión, gráficos de Violín, Análisis de Concordancia de Bland y Altman y comparación de medianas con la Prueba U de Mann-Whitney. Mediante la prueba U de Mann-Whitney, se logra determinar que solo una estación (Bullileo Embalse) presenta diferencias estadísticamente significativas entre el método discreto y el método continuo, con un 95% de confiabilidad. Pero, con un  $\alpha=0.1$  o un 90% de confiabilidad, esta conclusión se invierte porque 6 de las 7 estaciones presentarían diferencias significativas. Lo anterior determina que hay que ser muy cuidadoso a la hora de elegir la significancia, por sus implicancias en la generación de los datos para diseños hidrológicos e hidráulicos.

**Palabras clave:** Intensidad diaria máxima anual, medición de precipitación.

### Abstract

*In this study, it was analyzed if there are significant differences between 24-hour precipitation measurements, performed with discrete lapses (from 8 AM to 8 AM), and continuous 24-hour lapses. For this, we worked with data from 7 pluviographic stations located in the Maule Region (Potrero Grande, Pencahue, Talca, Colorado, Melozal, Parral and Bullileo Embalse) from which maximum annual precipitation was obtained in continuous and discrete periods. Information was obtained from continuous and discrete records with variable data lengths (between 28 and 39 years). Both records were subjected to statistical analysis with measures of central tendency and dispersion, Violin plots, Bland and Altman Analysis of Agreement and comparison of medians with the Mann-Whitney U Test. Finally, using the Mann-Whitney U test, it is possible to determine that only one station (Bullileo Embalse) presents statistically significant differences between the discrete method and the continuous method, with 95% reliability. But, with  $\alpha = 0.1$  or 90% reliability, this conclusion is inverted because 6 of the 7 stations would present significant differences. The above determines that it is necessary to be very careful when choosing significance, due to its implications in the generation of data for hydrological and hydraulic designs.*

**Keywords:** Annual maximum daily intensity, precipitation measurement.

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento sobre el comportamiento temporal y espacial de las precipitaciones es un elemento de suma importancia para el desarrollo humano, pues entrega información útil en el área de la hidrología, que es clave en la planificación estratégica de recursos y para diversas áreas que van desde el urbanismo a la agricultura (Campos-Aranda, 2010; Burn, 2014). Una herramienta que permite analizar la cantidad de agua caída es la intensidad de la precipitación, que se define como la variación de precipitación en un diferencial de tiempo, la cual generalmente se representa en mm/h. Esta cantidad puede ser relacionada con la frecuencia y duración de un evento de manera estadística, dando origen a las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Para elaborar estas curvas IDF se precisa de información de intervalos de precipitación de al menos una hora e idealmente en lapsos menores con el fin de poder analizar el comportamiento de las intensidades, dado que estas poseen una mayor probabilidad de alcanzar mayores valores en la medida que la duración del fenómeno de precipitación sea menor en el tiempo (Chow et al., 1998). Es decir, las curvas IDF corresponden a una familia de curvas del tipo exponencial negativo y en donde cada curva corresponde a un diferente periodo de retorno. Lo expuesto en el anterior párrafo, obliga a pensar que las curvas IDF solo pueden ser construidas con registros continuos de precipitación en el tiempo. No obstante, diversos autores e instituciones han propuesto diferentes metodologías para intentar aproximarse a la construcción de curvas IDF en zonas en que no cuentan con registros continuos de precipitación. Una de estas propuestas es la realizada por Pizarro et al. (2015, 2018) en donde propuso un índice de tormenta que puede ser aplicado a estaciones con registros cada 24 horas (estaciones pluviométricas). El método plantea que en las estaciones pluviográficas o con registros continuos, es posible obtener un cociente entre la intensidad de lluvia para una duración y un periodo de retorno dado y la intensidad para 24 horas y el mismo periodo de retorno, cociente que se denomina índice de tormenta y puede ser aplicado a estaciones pluviométricas. Ahora bien, para la elaboración del índice de tormenta se utilizan como datos base los registros continuos de las máximas intensidades anuales de diferentes duraciones, los cuales provienen de una estación pluviográfica. El índice de tormenta que se consigue es posteriormente aplicado a datos

provenientes de una estación pluviométrica donde solo se cuenta con información de 24 horas. Esta aplicación permite realizar una extrapolación de las curvas IDF. Sin embargo, los datos de la estación pluviométrica han sido registrados a lo largo del tiempo de una forma discreta, es decir cada 24 horas (de 8 a 8). Por otra parte, los valores de las estaciones pluviográficas son obtenidos de manera continua. Entonces surge la pregunta; ¿la serie de valores capturada de 8AM a 8AM, diferirá mucho si la serie es capturada en cualquier lapso manteniendo las 24 horas? Y esa es la interrogante que pretende abordar este estudio.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Selección de estaciones pluviográficas

Los datos base para la elaboración del estudio provienen de estaciones pluviográficas aportadas por la Dirección General de Aguas de Chile (DGA), las cuales cuentan con registros desde el año 1971 las más antiguas, hasta el año 2009. Después de esta fecha no se logró obtener datos debido a que el método de registro de precipitaciones cambió de pluviógrafos tradicionales a pluviógrafos digitales. Es importante destacar que la información pluviográfica está almacenada en registros del servidor que para tales efectos posee el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) de la Universidad de Talca, Chile. Las estaciones pluviográficas, por medio de bandas de papel milimetrado, han registrado la totalidad de eventos de precipitación en forma continua. Tradicionalmente la extracción de información de precipitación en distintos lapsos se ha obtenido de manera análoga, lo cual resulta una tarea tediosa cuando se cuenta con una gran cantidad de años de registro en conjunto con varias estaciones. Debido a esto, en el marco del proyecto FONDEF D08I1054, (Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Chile), se desarrolló un lector de bandas pluviográficas el cual, mediante un software, identifica la traza registrada por el pluviógrafo en la banda y genera una tabla de datos de tres columnas: fecha, hora y altura de precipitación (mm). Las estaciones pluviográficas utilizadas se encuentran distribuidas dentro de la Región del Maule, zona centro sur de Chile. En la Tabla 1 se muestran las estaciones de las cuales se pudieron obtener los datos desde el CTHA, en conjunto con las coordenadas UTM, su altitud y periodo de registro. Con las coordenadas UTM de las estaciones, en conjunto con

información cartográfica, en específico con un modelo digital de elevación de la Región del Maule, un mapa de las zonas climáticas de Chile según Koeppen (escala 1:500.000) extraída del portal de

Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile (IDE Chile) y, un mapa político de Chile, se realizaron, mediante QGIS, cartografías que describen el lugar de las estaciones ya mencionadas.

Tabla 1. Estaciones utilizadas

n	Estación	Coordenadas UTM		Altitud (m)	Periodo de Registro
		N	E		
1	P. Grande	6104860	309175	450	1971-2009
2	Pencahue	6081931	242659	110	1974-2009
3	Talca	6075755	262463	110	1982-2009
4	Colorado	6053778	295308	470	1971-2009
5	Melozal	6037743	248556	90	1971-2009
6	Parral	5991450	245651	160	1974-2009
7	Bullileo. E.	5981671	283173	600	1971-2009

## 2.2 Tratamiento de la información

En base a la información obtenida desde el CTHA, fue posible obtener archivos de información pluviográfica continua, en archivo de texto (extensión txt). Cada uno de los archivos contenía información de cada estación. Dicha información debió ser dividida en diferentes intervalos temporales, derivado del altísimo volumen de información presente. De esa manera fue posible que el archivo fuese leído por un programa de manejo de datos en formato de

archivos separados con coma (extensión csv); en este caso el programa utilizado fue Excel. Ahora bien, los archivos transformados a Excel son expresados todos en una misma columna, por ello se procedió a separarlos mediante la función de Excel “Texto en columnas”, el que divide el contenido en varias columnas, seleccionando como caracteres divisorios los guiones y las comas, quedando como se muestra en la Figura 1.

	A	B	C	D	E
1	Año	Mes	Día	Hora	PP
39728	1971	5	21	6:30	98,62
39729	1971	5	21	6:35	98,95
39730	1971	5	21	6:40	98,99
39731	1971	5	21	6:45	99,04
39732	1971	5	21	6:50	99,06
39733	1971	5	21	6:55	99,07
39734	1971	5	21	7:00	99,09
39735	1971	5	21	7:05	99,10
39736	1971	5	21	7:10	99,12
39737	1971	5	21	7:15	99,12
39738	1971	5	21	7:20	99,12
39739	1971	5	21	7:25	102,99
39740	1971	5	21	7:30	105,63
39741	1971	5	21	7:35	107,00
39742	1971	5	21	7:40	107,13
39743	1971	5	21	7:45	107,13
39744	1971	5	21	7:50	107,29
39745	1971	5	21	7:55	107,46
39746	1971	5	22	8:00	107,46
39747	1971	5	22	8:05	107,46
39748	1971	5	22	8:10	107,46

Figura 1. Ejemplo de datos separados

### 2.3 Cálculo de las precipitaciones diarias

Los datos obtenidos a partir de la transformación a Excel permiten que la información se exprese en forma de pluviograma (precipitación acumulada en el tiempo). De esta manera Excel permite procesar la información estableciendo diferenciales de precipitación cada 24 horas. Dicho de otra manera, se realizó una resta entre los datos de precipitación con intervalos casi continuos de 24 horas, obteniendo en una columna anexa los datos de precipitación diarias que pueden obtenerse de una serie de información continua. Con el objetivo de verificar que no existiesen datos faltantes mediante el proceso de digitalización, se realizó otra columna de valores horarios desplazada en 5 minutos y se comparó con la que ya se había generado precedentemente. Si no había diferencias, se asumía el dato registrado como valor válido. Al contrario, si se generaban diferencias se revisaba la información con el fin de determinar si había alguna incongruencia en los datos. Es preciso señalar que nunca se encontraron diferencias.

### 2.4 Captura de la información en 24 horas en horario fijo y continuo

Con la matriz de datos ya lista se procedió a utilizar la metodología de tablas dinámicas para Excel. Así, en el campo de "Filas" se seleccionaron los años y en el campo de "Valores" se seleccionó el máximo de las precipitaciones cada 24 horas. Con ello se obtuvo el máximo valor anual de un evento de precipitación ocurrido en una duración de 24 horas, en cualquier horario, como se muestra en la primera tabla de la Figura 2. Por otra parte, se le agregó el tiempo a la misma tabla dinámica en el campo de "Filtros", obteniendo de esta manera solo las precipitaciones registradas entre las 8:00 AM y las 8AM del día siguiente, como se puede ver en la Figura 2. De esta forma se obtuvo el máximo de precipitación diaria ocurrida en dicho horario, simulando la medición de precipitaciones que se hace de manera tradicional mediante pluviómetros.

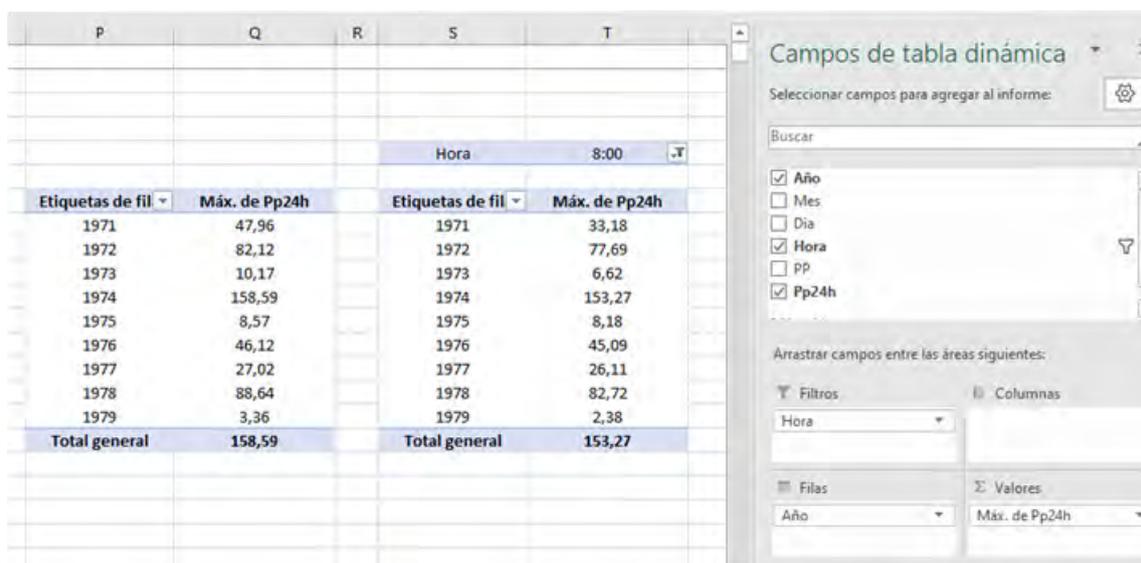


Figura 2. Ejemplo de Tablas dinámicas utilizadas.

Es importante señalar que, debido a errores de diversa naturaleza que se presentaron, es que hubo años en distintas estaciones en donde los valores de precipitación no fueron registrados o bien fueron mal registrados. Por ello, en los datos diarios donde la precipitación en 24 horas fue menor a 5 mm, se decidió borrarlos del registro, pues definían un evidente error. El porcentaje de años con error no

superó el 3% del total de años (2.7%). Con esta información ya ordenada se obtuvieron dos series de datos para cada estación: una de la precipitación diaria máxima anual en horario continuo (PDMAC), y la otra de la precipitación diaria máxima anual en un horario discreto, específicamente de 8:00 a 8:00 (PDMAD). Estas series de datos fueron las utilizadas para el posterior análisis estadístico.

### 2.5 Análisis estadístico

Se utilizaron diversos análisis estadísticos y matemáticos para el análisis de los datos. Adicionalmente se debe señalar que generalmente, los datos hidrológicos tienen un comportamiento no paramétrico, es decir, no presentan normalidad en sus datos, hecho que obliga a utilizar pruebas no paramétricas. Por lo tanto, los datos fueron analizados en base a lo siguiente.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  son las observaciones de la variable y  $n$  el número total de observaciones.

Se debe tener en cuenta que la media es un valor sensible a observaciones atípicas o extremas. Un valor alejado del resto puede generar un cambio importante en el valor de la media. La mediana se presenta como una opción al cálculo de la media y tiene la ventaja de que no es sensible a registros atípicos o extremos. Para un conjunto de datos, el valor de la mediana se consigue de forma que deja la misma cantidad de observaciones a su izquierda que

### 2.6 Medidas de tendencia central (media y mediana)

La media aritmética es una medida de tendencia central muy utilizada. Se interpreta como el promedio de los datos y se construye de forma que interviene la totalidad de los datos observados. Se calcula a través de la siguiente forma:

a su derecha (Moncho, 2014). Aunque podría existir una infinidad de valores que cumplirán este requisito para un grupo de observaciones, la forma habitual de cálculo garantiza que la mediana será única para una serie de datos. Así, en primer lugar, los datos se ordenan de menor a mayor. Después de esto, se calculará el rango de la mediana ( $r_{md}$ ), que informará sobre la posición que debe ocupar esta, de la siguiente forma:

$$r_{md} = \frac{n + 1}{2}$$

Finalmente, dentro de los datos ordenados la mediana será el dato en específico que ocupa la posición  $r_{md}$ , en el caso que  $n$  sea impar. Ahora, si el número total de datos fuera par, para obtener la mediana se calcularía la semisuma entre los dos datos centrales.

### 2.7 Medidas de dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación)

La desviación típica o estándar es una medida resumen de la distancia de cada dato a la media (Moncho, 2014). Se define la varianza como la sumatoria de las diferencias entre cada dato y su

media al cuadrado, dividido por el número de datos en el caso de una población. La varianza está expresada, por tanto, en unidades al cuadrado de la variable. Para conseguir una medida en las mismas unidades que la variable original se extrae la raíz cuadrada, obteniéndose la denominada desviación típica o estándar. El coeficiente de variación se obtiene dividiendo la desviación estándar ( $S$ ) por la media ( $\bar{x}$ ); si este se multiplica por 100, podrá interpretarse como el porcentaje de variabilidad de los datos para los que se calcula.

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad S = \sqrt{S^2} \quad CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

### 2.8 Diagrama de violín

Un diagrama de violín (Hintze y Nelson, 1998), es básicamente una combinación de un gráfico de caja y un histograma suavizado. Un gráfico de caja (Figura 3) es un método utilizado para representar gráficamente una serie de datos numéricos, exponiendo 4 características principales de una variable; centro, extensión, asimetría y valores

atípicos. Por su parte el histograma (Figura 4) se obtiene al graficar frecuencias relativas de las clases contra sus respectivos intervalos; este se utiliza ya que puede hacer evidentes los patrones existentes dentro de un conjunto de datos (Canavos, 1987). Hintze y Nelson (1998) señalan que individualmente, los gráficos de caja proveen resúmenes sucintos de datos. La combinación sinérgica del diagrama de caja y el histograma permite que gran parte de la

información de cada uno se muestre en un diagrama (Figura 5). Esta estructura de gráfico único permite que las comparaciones de factores de distribución de

varias variables sean más fáciles de hacer y a esto se denomina gráfico de violín.

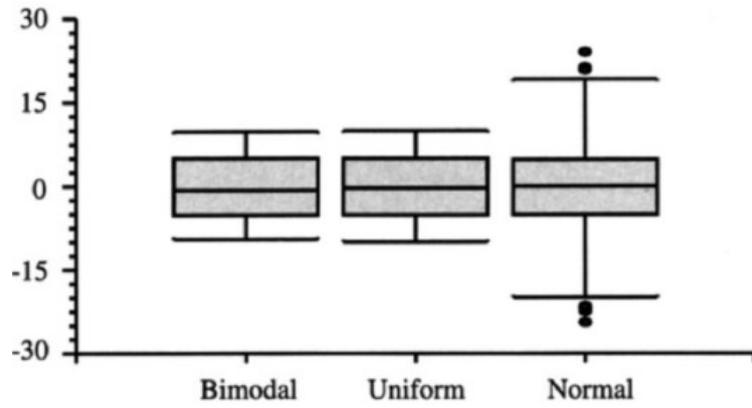


Figura 3. Ejemplo de gráficos de cajas para distribuciones conocidas (Hintze y Nelson, 1998)

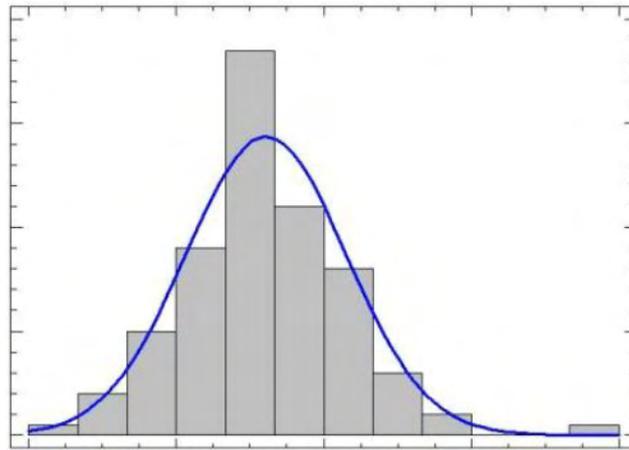


Figura 4. Ejemplo de histograma con curva de suavización.

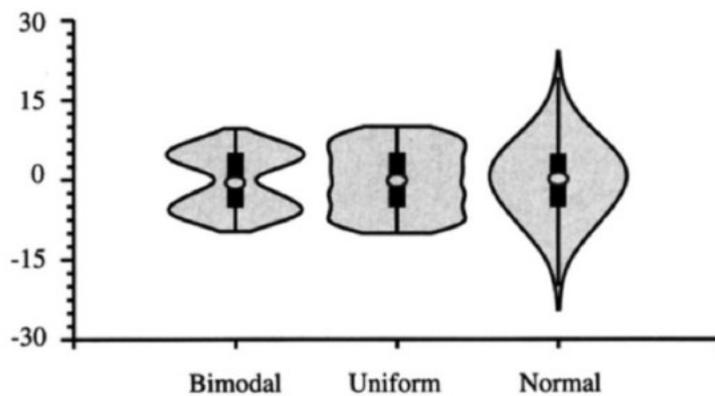


Figura 5. Ejemplo de gráficos de violín para distribuciones conocidas

### 2.9 Análisis de Concordancia de Bland y Altman

Análisis de Concordancia de Bland y Altman (ACBA). Carrasco y Jover (2004) señalan que a través de esta prueba se puede establecer si los modelos de estimación son intercambiables, es decir, si concuerdan lo suficiente. Para su cálculo, se obtienen las diferencias promedio (dp) entre el valor

$$LC = dp \pm 1,96 \cdot DS$$

Así, la relación valor real versus valor estimado con un dp en valor absoluto lo más cercano a cero, será la de mejor ajuste. Si llegase a existir una igualdad o una mínima diferencia del valor dp, el mejor ajuste corresponderá al que presente un menor valor DS y sus límites de concordancia sean más estrechos (Bland y Altman, 1999). Entonces, de no existir error

real y el estimado. Esta diferencia representa el error sistemático, y la varianza de las diferencias (DS) da cuenta de la imprecisión. De esta forma, se obtienen los límites de concordancia del 95%. Este límite de concordancia (LC) está definido por la expresión:

sistemático, los puntos que representan el valor de la diferencia de los datos se distribuirán de forma aleatoria a uno y otro lado de la recta, lo que corresponde a la diferencia cero entre medidas, como muestra la figura 6. En esta, la línea de color rojo representa la media de las diferencias y las líneas azules representan los límites de confianza.

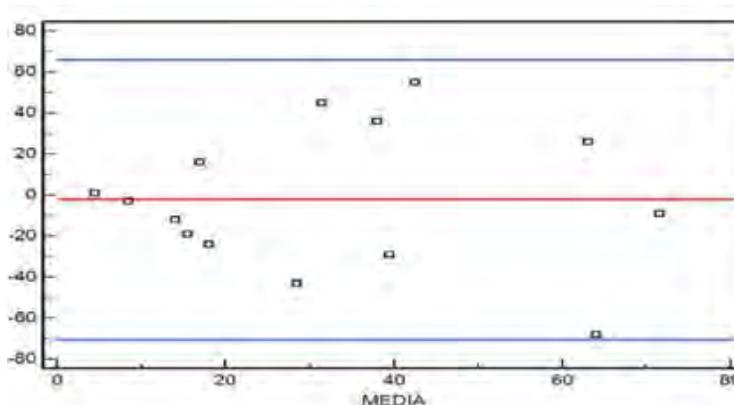


Figura 6. Ejemplo gráfico de la prueba de concordancia de Bland y Altman

### 2.10 Prueba U de Mann-Whitney

La prueba U de Mann-Whitney es uno de los procedimientos más usados para demostrar si dos poblaciones tienen la misma distribución (UNESCO, 2013). Se utiliza para series no paramétricas, por lo tanto, no es necesario analizar los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas (Lind et al, 2001). Canavos (1987) indica que el equivalente no paramétrico de la prueba t de Student es la prueba U de Mann Whitney. Se basa en la combinación de 2 series, con n1 y n2 observaciones respectivamente, para formar un solo conjunto de n1+n2 observaciones. Luego estas observaciones se arreglan en orden creciente de magnitud, y se asigna un rango a cada observación en la secuencia. Si la mayor de las

muestras tiene más de 20 observaciones, se considera una muestra grande. En su defecto, si tiene 20 o menos observaciones se considera una muestra pequeña (Lind et al, 2001). Para determinar si dos poblaciones presentan o no la misma distribución, la prueba U de Mann Whitney establece las siguientes hipótesis:

H0: No existen diferencias significativas entre las medianas de los grupos, con un nivel de confianza del 95%.

Ha: Existen diferencias significativas entre las medianas de los grupos, con un nivel de confianza del 95%.

Debido a que las muestras de este estudio todas tienen 20 o más observaciones, a continuación, se presenta el procedimiento utilizado para las muestras grandes, propuestas por Mendenhall et al. (1997):

Para  $N > 20$

Paso 1: Se unen ambas muestras  $n_1$  y  $n_2$  para formar un solo conjunto ( $n_1+n_2$ ) datos.

$$U_A = n_1 \cdot n_2 + \frac{(n_1(n_1 + 1))}{2} + T_A$$

$$U_B = n_1 \cdot n_2 + \frac{(n_2(n_2 + 1))}{2} - T_B$$

Donde  $n_1$  y  $n_2$  son el número de datos para las muestras A y B, respectivamente; y  $T_A$  y  $T_B$  se refieren a la suma de los rangos para las muestras A y B, respectivamente.

Paso 4: Se realiza una aproximación a una distribución normal de la siguiente manera:

$$Z = \frac{U - E(U)}{\sqrt{V(U)}}$$

donde

$U$  = es el valor mayor seleccionado entre  $U_A$  y  $U_B$ ;

$$E(U) = \frac{n_1 \cdot n_2}{2} \quad V(U) = \frac{n_1 \cdot n_2 + (n_1 + n_2 + 1)}{12}$$

Paso 5: Se busca el valor correspondiente a la probabilidad (valor P) asociada al Z calculado y de acuerdo con el nivel de significancia escogido.

Paso 6: Para  $\alpha < 0,05$ , los valores críticos son  $\pm 1,96$ . Por lo tanto, si el valor P calculado cae dentro de esa región, se acepta la hipótesis nula.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Cartografía

Las estaciones utilizadas para este estudio se muestran en la Figura 7, la que proyecta la ubicación geográfica de las estaciones bajo un modelo de elevación del terreno. Así se observa que las estaciones Potrero Grande (1), Colorado (4) y Bullileo Embalse (7), están ubicadas en las cercanías de la precordillera. Por otra parte, las estaciones de Talca (3), Melozal (5) y Parral (6) se ubican en la depresión intermedia, quedando solo la estación de Péncahue (2) en las cercanías de la cordillera de la costa, hacia el secano interior. Por otro lado, la Figura 8 define la ubicación de las estaciones bajo la clasificación climatológica de Köppen-Geiger (1936), la que clasifica diferentes climas basándose en dos factores: precipitación y temperatura (Seoáñez Calvo,

2001). Dentro de la región existen dos climas: Clima de tundra, ubicado en la cordillera, y el clima mediterráneo, que abarca gran parte de la región. Este último se subdivide en 4 subtipos dependiendo de la temperatura y cantidad de precipitación. De importancia son entonces el clima mediterráneo de lluvia invernal y el clima mediterráneo de lluvia invernal con influencia de altura, pues dentro de estos tipos climáticos se encuentran las estaciones. Así, las estaciones Péncahue (2), Talca (3), Melozal (5) y Parral (6) se ubican dentro del clima mediterráneo de lluvia invernal y las estaciones Potrero Grande (1), Colorado (4) y Bullileo Embalse (7) en una zona de transición entre clima mediterráneo de lluvias invernal y el clima mediterráneo de lluvia invernal de altura.

### Región del Maule

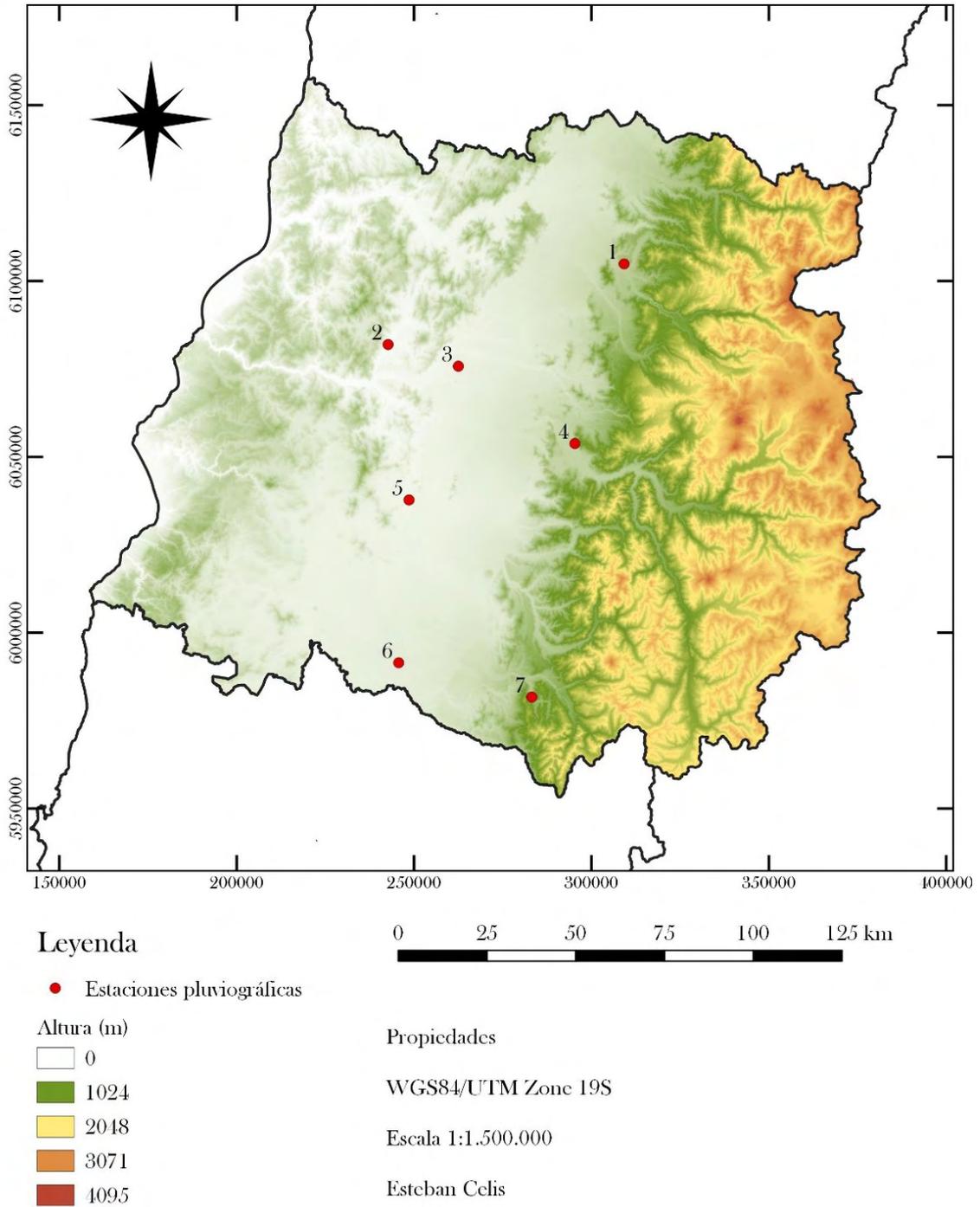
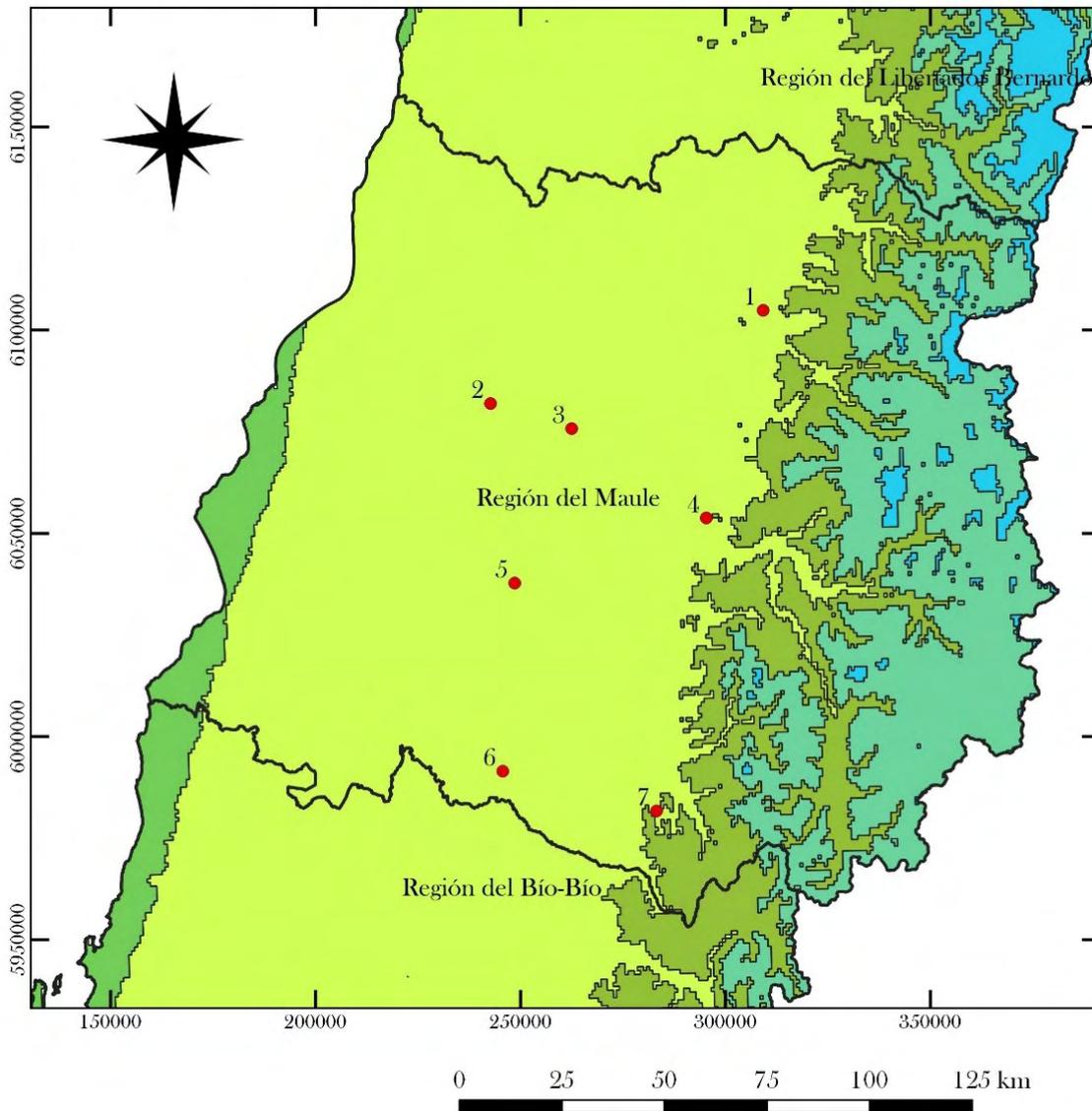


Figura 7. Mapa con las estaciones utilizadas, detalle de altitud

## Región del Maule



### Leyenda

● Estaciones

Clima según Köppen

- Clima de tundra de lluvia invernal
- Clima mediterráneo de lluvia invernal
- Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura
- Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera
- Clima mediterráneo frío de lluvia invernal

Propiedades

WGS84/UTM Zone 19S

Escala 1:1.500.000

Esteban Celis

Figura 8. Mapa con las estaciones utilizadas. Detalle clasificación climática según Köppen-Geiger (Sarricolea et al., 2017)

### 3.2 Medidas de tendencia central y de dispersión

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las medidas de tendencia central y dispersión mencionadas en los puntos 2.6 y 2.7. Este se realizó por cada método y estación. En la tabla 2 se aprecia que los valores más altos de medias para la precipitación diaria máxima anual (PDMA) se encuentran en las estaciones de Potrero Grande, Colorado y Bullileo Embalse, valores que se explicarían debido a la cercanía a la precordillera que estas estaciones comparten, a lo que se suma que Bullileo E. se encuentra cercana al embalse del mismo nombre (Pizarro et al., 2013). Al contrario, las estaciones ubicadas dentro de la depresión intermedia son las que presentan valores

promedio de menor envergadura. Con respecto a la mediana, se puede afirmar que el comportamiento es similar a lo expuesto para la media en el párrafo anterior. Cabe destacar que esta medida de tendencia central es un mejor indicador que la media, debido a la naturaleza no paramétrica de los datos. El coeficiente de variación por su parte presenta los valores menores en las estaciones de Colorado y Bullileo Embalse, con valores que varían entre 31% y 34%. En contraste, las estaciones que presentaron coeficientes de variación mayores son las de Potrero Grande y Melozal, con valores que rondan el 50% y el 60%.

Tabla 1. Medidas de tendencia central y de dispersión para cada estación

Estación	Método de medición	Número de datos	Media	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Potrero Grande	PDMAC	38	82.13	82.09	41.12	50%
	PDMAD	38	70.46	71.55	33.35	47%
Pencahue	PDMAC	36	54.38	53.31	23.86	44%
	PDMAD	36	47.07	43.51	20.31	43%
Talca	PDMAC	26	53.29	56.59	22.36	42%
	PDMAD	26	45.68	47.57	17.93	39%
Colorado	PDMAC	38	103.69	105.06	32.43	31%
	PDMAD	38	92.99	89.98	31.18	34%
Melozal	PDMAC	37	58.42	59.25	34.09	58%
	PDMAD	37	50.18	47.41	31.72	63%
Parral	PDMAC	35	71.50	70.82	28.67	40%
	PDMAD	35	60.69	60.57	22.16	37%
Bullileo Embalse	PDMAC	39	144.07	147.20	47.98	33%
	PDMAD	39	126.20	123.51	40.22	32%

PDMAC: Precipitación diaria máxima anual en horario continuo, PDMAD: Precipitación diaria máxima anual en horario discreto.

Para realizar una comparación de las medidas de tendencia central y dispersión entre ambos métodos de medición (medición continua y discreta), se estableció un análisis que estima las diferencias

porcentuales entre ambos métodos, lo que se expresa en la Tabla 3. Para las tres medidas se estableció un indicador definido como sigue:

$$\text{Indicador porcentual} = \frac{(PDMAC - PDMAD) \cdot 100}{PDMAD}$$

Donde PDMAC: Precipitación diaria máxima anual medida en horario continuo; PDMAD: Precipitación diaria máxima anual medida en horario discreto.

Tabla 3. Indicador porcentual (%) para las 3 medidas

Estación	Media	Mediana	Coef. Var.
Potrero Grande	16.56	14.73	5.76
Pencahue	15.51	22.52	1.67
Talca	16.66	18.96	6.88
Colorado	11.51	16.77	-6.73
Melozal	16.43	24.97	-7.68
Parral	17.81	16.92	9.83
Bullileo Embalse	14.16	19.18	4.51

Con respecto a la diferencia porcentual de la media, esta fluctúa entre 11.5% y 17.8% entre todas las estaciones. La mediana por otro lado presenta diferencias porcentuales mayores entre ambos métodos de medición, variando desde 14.7% hasta un 25%. Sin embargo, es importante destacar que las diferencias porcentuales entre ambos métodos de medición entregan siempre valores positivos para las medidas de tendencia central, lo que demuestra que tanto las medias como las medianas obtenidas por mediciones continuas son más altas que aquellas obtenidas con medición discreta de 8AM a 8AM. Al contrario, las diferencias porcentuales presentadas en el coeficiente de variación presentan tanto signos positivos como negativos, lo que indicaría a primera

vista que el método de medición escogido no influye positiva o negativamente en los resultados entregados por el coeficiente de variación. Con el objetivo de profundizar acerca de las diferencias de los métodos de medición (PDMAC y PDMAD), la Tabla 4 indica el promedio de las medidas de tendencia central y dispersión por cada método. En el cuadro se pueden notar las diferencias existentes entre los métodos de medición a modo global, las cuales son 10.6 mm para la media y 12.9 mm para la mediana, y siempre al favor del método continuo, lo que ratifica lo expuesto en el párrafo precedente. En cuanto al coeficiente de variación, este prácticamente no presenta diferencias al momento de elegir diferentes métodos de medición.

Tabla 4. Promedio de las medidas de tendencia central y dispersión por cada método de medición

Estación	Media		Mediana		Coef. Var.	
	PDMAC	PDMAD	PDMAC	PDMAD	PDMAC	PDMAD
Promedio	81.07	70.47	82.05	69.16	43%	42%

### 3.3 Diagrama de Violín

En términos generales, se aprecia que la distribución de los datos de precipitación diaria, estimados de forma continua o discreta, muestran similitudes para todas las estaciones, a excepción de la estación Bullileo Embalse. Esto porque en esta última estación se aprecian diferencias entre ambos métodos (Figura 9). Así mismo, la distribución de las precipitaciones se encuentra más acotada en el método discreto en comparación con el continuo para todas las estaciones analizadas, lo que se verifica en las gráficas correspondientes. Por otra parte, las

distribuciones de ambos métodos son multimodales, es decir, existen varias modas al interior de la distribución.

### 3.4 Análisis de concordancia de Bland y Altman (ACBA)

Como ya se mencionó previamente en el punto 2.9, la prueba de Bland y Altman compara los datos de ambas técnicas de medición, en donde una diferencia promedio (dp) más pequeña indicaría que no existen grandes diferencias entre métodos. De acuerdo con Doğan (2018), el análisis de Bland y Altman es un método simple y preciso para cuantificar la

concordancia entre dos variables y puede servir de ayuda a los investigadores al comparar un nuevo método de medición contra otro tradicional. Así

mismo, usar este enfoque facilita hacer un juicio objetivo de las propiedades del método (Cao et al., 2020).

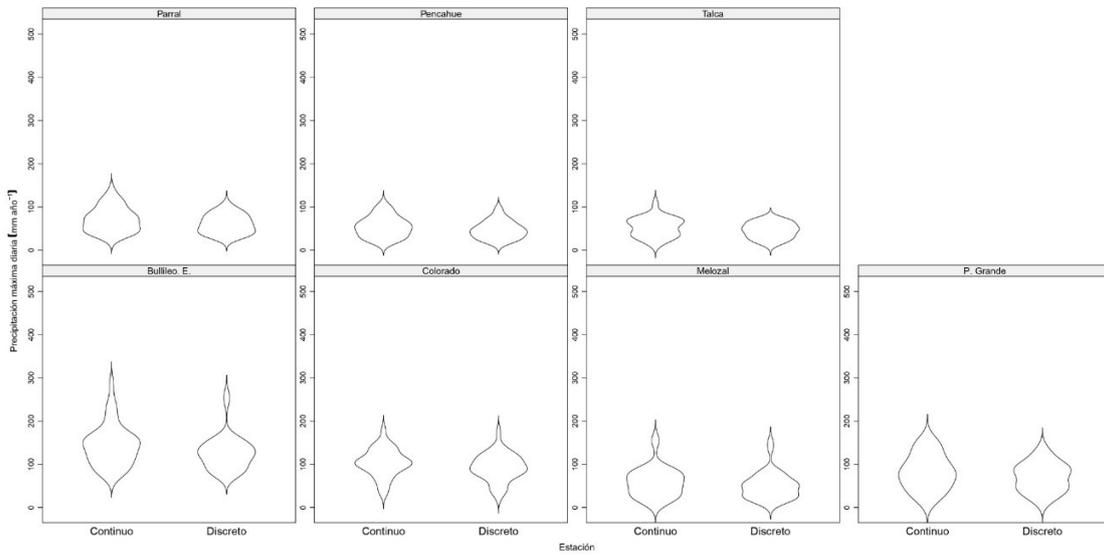


Figura 9. Diagramas de violín para las estaciones

Tabla 5. Prueba de Bland y Altman, entre ambos planteamientos (PDMAC y PDMAD) por cada estación.

Estación	dp	DS	LS	LI
Potrero Grande	11.67	15.24	41.55	-18.20
Pencoahue	7.30	8.67	24.30	-9.69
Talca	7.61	8.40	24.07	-8.85
Colorado	10.70	9.33	29.00	-7.59
Melozal	8.25	8.51	24.92	-8.43
Parral	10.81	11.49	33.33	-11.71
Bullileo Embalse	17.87	19.33	55.74	-20.01

Diferencias promedio (dp), desviación estándar de las diferencias (DS) y límites de concordancia (LS y LI)

En la Tabla 5 se muestran los estadísticos de Bland y Altman. Las mayores diferencias promedio (dp) se manifiestan en las estaciones ubicadas en la zona precordillerana andina, a saber, Potrero Grande, Colorado y Bullileo Embalse. En estas, las dp fluctúan entre los 10.7 mm y 17.87 mm. Por otra parte, las estaciones de Pencoahue, Talca y Melozal presentan valores menores, con diferencias promedios que fluctúan entre los 7.3 mm y 8.3 mm,

ubicándose estas en la depresión intermedia. La estación de Parral denota una dp alta, aunque se ubica en la depresión intermedia, siendo la única de este grupo que manifiesta esta particularidad. De la Figura 10 se puede afirmar en términos generales que, a medida que aumenta el promedio de los métodos comparados, existe una mayor probabilidad de encontrar diferencias mayores entre los métodos de medición.

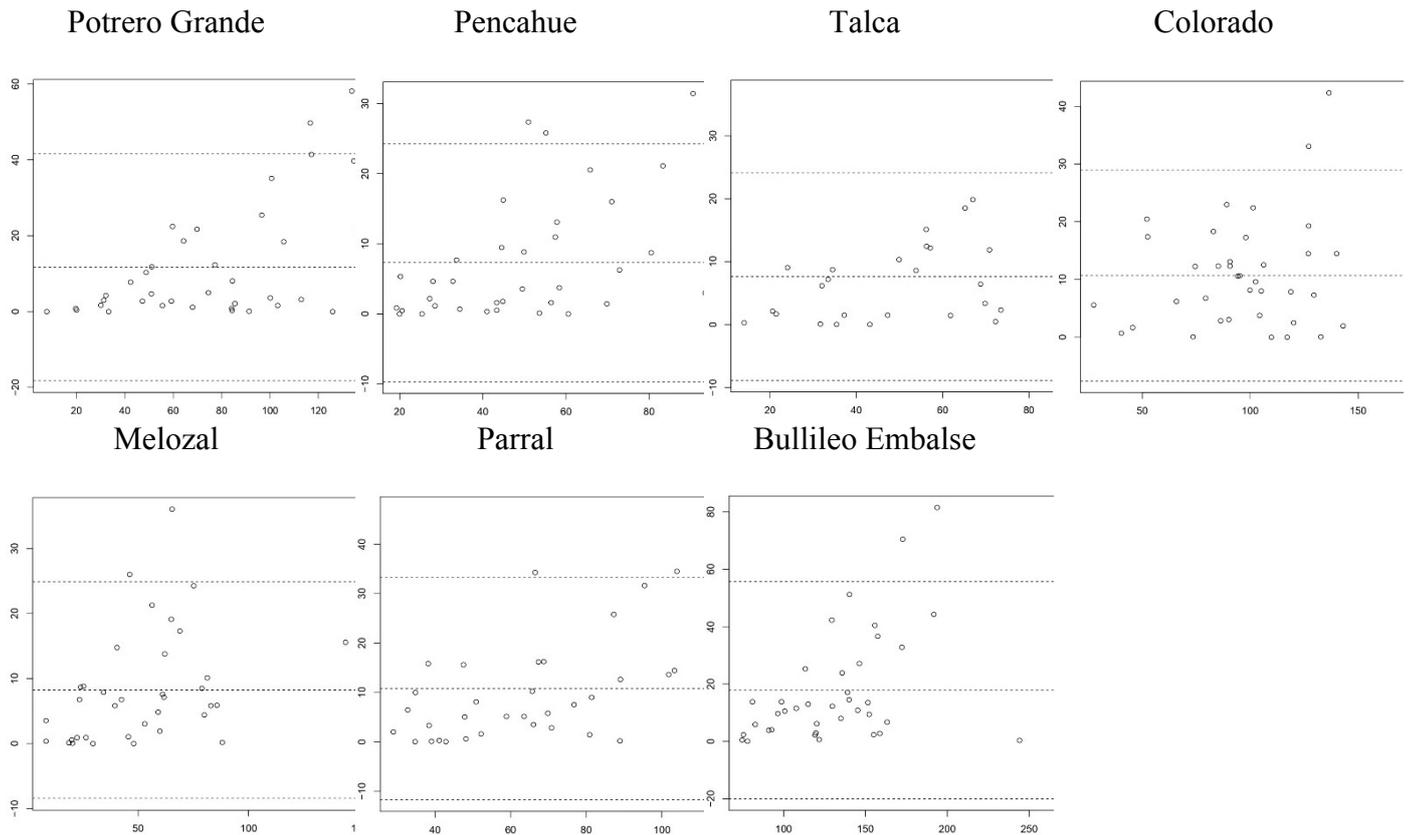


Figura 10. Gráficos de la prueba Bland-Altman por estación; En las ordenadas, la diferencia entre ambos métodos de medición, y en las abscisas, el promedio entre los métodos.

### 3.5 Prueba U de Mann-Whitney

Mauget (2010) señaló que el método de Mann-Whitney se presenta como una robusta opción en el análisis de series de tiempo, pues es capaz de detectar una extensa gama de variaciones de datos, derivado que establece pocas suposiciones limitantes sobre cómo varían los datos a lo largo del tiempo. Los resultados encontrados al aplicar el estadístico de Mann-Whitney muestran que a nivel macro existen

diferencias estadísticamente significativas ( $P=0.0098$ ) al comparar ambos métodos (Tabla 6). Sin embargo, y a pesar de los prominentes resultados descritos en el punto 3.2 de este estudio, solo Bullileo Embalse presenta diferencias estadísticamente significativas entre los datos continuos y discretos ( $p=0.0281$ ), presentando todas las demás un valor p mayor a 0.05.

Tabla 6. Valor P de U de Mann Whitney al 95% de confiabilidad, para las estaciones en estudio.

Estación	Valor P	Estación	Valor P
Global	0.0098*	Colorado	0.0614
Potrero Grande	0.1091	Melozal	0.0832
Pencahue	0.0919	Parral	0.0656
Talca	0.0893	Bullileo. E.	0.0281*

Ahora bien, si el umbral se cambiara al 10% de significancia ( $\alpha=0.1$ ) la totalidad de las estaciones presentaría diferencias estadísticamente significativas, a excepción de Potrero Grande, como lo expresa la Tabla 6. De lo anterior se desprende que, con un 99% de confiabilidad no existen diferencias significativas entre ambos métodos; que al 95% de confiabilidad, solo Bullileo Embalse presenta diferencias; y que al 90% de confiabilidad todas las estaciones presentan diferencias significativas entre ambos métodos, a excepción de Potrero Grande. Esto determina que dependiendo del tipo de confiabilidad que se quiera aceptar y del nivel de precisión, los dos métodos en análisis podrán ser cuestionados para su uso o no. No obstante lo anterior, en hidrología es altamente utilizado un  $\alpha=0.05$ , lo que determinaría que en general no hay diferencias entre ambos métodos, a excepción de una de las 7 estaciones. En el presente estudio se utilizaron datos de la misma estación para comparar datos continuos y datos discretos de precipitación en 24 horas, es decir se tomó igual longitud de serie para ambos tipos de datos. Los resultados definieron que el método continuo obtendrá valores más altos de precipitación que el método discreto para una misma serie de tiempo. Sin embargo, esto no ocurre en la realidad para la aplicación del método K o Índice de Tormenta, porque dicho método utiliza información de una estación pluviográfica cercana, para su aplicación en otra estación pluviométrica. Aún más, sucede que generalmente los datos tomados en forma tradicional desde estaciones pluviométricas cuentan con una mayor longevidad que las estaciones pluviográficas, debido a su facilidad y simpleza al momento de registrar datos. Por ende, una estación pluviométrica (registros de 8AM a 8AM), probablemente tendrá una mayor longitud de la serie, y por tanto una mayor probabilidad de encontrar valores mayores de precipitación, lo que podría compensar las carencias del método discreto frente al método continuo. Cabe mencionar que la estaciones pluviográficas utilizadas no cuentan con un pluviómetro a su lado, por lo que fue necesario "simular" las mediciones de un pluviómetro

obteniendo las precipitaciones diarias en un horario fijo y después filtrando las máximas anuales desde los datos del pluviógrafo. Si existiese dicha información sería posible efectuar el mismo análisis, puesto que esas son las diferencias que busca encontrar este estudio, y en parte sería beneficioso pues estaría incluido el factor humano dentro del análisis, lo que sería más apegado a la realidad.

#### 4. CONCLUSIONES

De ambas series de datos obtenidas para las 7 estaciones en análisis, la información de precipitación en 24 horas, generada por el método continuo presenta valores superiores respecto a la información obtenida con el método discreto. Lo anterior es corroborado por las medidas de tendencia central (media y mediana) y el análisis de concordancia de Bland y Altman. Asimismo, el método de Bland y Altman, identifica que las diferencias entre el método continuo y el método discreto para la estimación de la precipitación en 24 horas se acrecientan en aquellas estaciones ubicadas en la precordillera andina, a lo que se suma la estación Parral, que es la más austral de la zona de estudio. Ello permitiría concluir que a mayor altitud hay mayor diferencia entre ambos métodos. Finalmente, mediante la prueba U de Mann-Whitney, se logra determinar que solo la estación Bullileo Embalse presenta diferencias estadísticamente significativas, entre el método discreto y el método continuo, con un 95% de confiabilidad. De acuerdo a los resultados, el método índice de tormenta estaría subestimando la información que este genera (curvas IDF), no obstante, esta diferencia se "minimiza" al tener una mayor cantidad de años lo que aumenta la probabilidad de encontrar tormentas de mayor magnitud. Por otra parte, si el estudio se expande a una mayor cantidad de estaciones sería posible encontrar cierto patrón en las diferencias lo que eventualmente podría llevar a una suerte "corrección" del método índice de tormenta el que proyecte el incremento de las precipitaciones diarias máximas anuales de ciertas estaciones.

#### REFERENCIAS

Bland, J., & Altman, D. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research*, 8(2), 135-160.

- Burn, D. H. (2014). A framework for regional estimation of intensity-duration-frequency (IDF) curves. *Hydrological Processes*, 4209-4218.
- Campos-Aranda, D. F. (2010). Intensidades máximas de lluvia para el diseño hidrológico urbano en la república mexicana. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XI(2), 179-188.
- Canavos, G. (1995). *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos*. México: Mc Graw-Hill.
- Cao, X., Bai, Z., Sun, C., Wen, J., Lin, X., & Sun, W. (2020). Bland-Altman Analysis of Different Radiographic Measurements of the Hallux Valgus Angle and the Intermetatarsal Angle After Distal Osteotomy. *Orthopaedic Surgery*(12), 1621-1626.
- Carrasjo, J., & Jover, L. (2004). *Métodos estadísticos para evaluar la Concordancia*. Barcelona: Med Clin.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1998). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Doğan, N. Ö. (2018). Bland-Altman analysis: A paradigm to understand correlation and agreement. *Turkish journal of emergency medicine*(18), 139-141.
- Hintze, J. L., & Nelson, R. D. (1998). Violin Plots: A Box Plot-Density Trace Synergism. *American Statistician*, 52(2), 181-184.
- Köppen, W., & Geiger, R. (1936). *Handbuch der Klimatologie*. Berlin: Gebrüder Borntraeger.
- Lind, D. A., Mason, R. D., & Marshall, W. G. (2001). *Estadística para la administración y economía*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Mauget, S. (2010). Time series analysis based on running Mann-Whitney Z Statistics. *Journal of Time Series Analysis*(32), 47-53.
- Mendenhall, W., & Sincich, T. (1997). *Probabilidad y estadística para la ingeniería y ciencias*. México: Prentice-Hall.
- Moncho, J. (2014). *Estadística Aplicada a Las Ciencias de la Salud*. Barcelona: Elsevier.
- Pizarro, R., Ben Ingram, F. G.-L.-P., Sangüesa, C., Delgado, N., García-Chevesich, P., & Valdés, J. (2018). WEBSEidf: A web-based system for the Estimation of IDF Curves in Central Chile. *Hidrology*, 5,40.
- Pizarro, R., Garcia Chevesich, P., Valdes, R., Dominguez, F., Hossain, F., Ffolliott, P., . . . Bro, P. (2013). Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity. *Journal of Hidrology*, 481(2), 56-63.
- Pizarro, R., Valdés, R., Abarza, A., & Garcia-Chevesich, P. (2015). A simplified storm index method to extrapolate intensity-duration-frequency (IDF) curves for ungauged stations in central Chile. *Hydrological Processes*, 641-652.
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandón, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of maps*, 13(2), 66-73.
- Seoáñez Calvo, M. (2001). *Tratado de climatología aplicada a la ingeniería ambiental*. Madrid: Mundi-Prensa.
- UNESCO. (2013). *Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Meule y Biobío- Intensidades de 14 minutos a 24 horas*. Montevideo, Uruguay: PHI-LAC, N°29.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

CC BY-NC-SA 4.0 license

---

## **SUSCRIPCIONES**

Si desea recibir la revista Aqua-LAC en forma  
periódica en formato digital envíe un correo electrónico a:

aqualac@unesco.org  
aqualac@uaq.mx

## **SUSCRIPTIONS**

*If you would like to periodically receive Aqua-LAC  
journal in digital format send an email to:*

*aqualac@unesco.org  
aqualac@uaq.mx*

<http://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC>



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
CC BY-NC-SA 4.0 license

---



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

## UNESCO

Programa Hidrológico Intergubernamental  
Oficina Regional de Ciencias  
para América Latina y el Caribe

*Intergovernmental Hydrological Programme  
Regional Office for Science  
for Latin America and the Caribbean*

Revista científica del Programa Hidrológico Intergubernamental  
en América Latina y el Caribe (PHI-LAC)

ISSN: 1688-2873

Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe  
UNESCO. Edificio Mercosur. Luis P. Piera 1992, 2º piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
aqualac@unesco.org

Centro de Investigaciones del Agua  
Campus Universitario Cerro de las Campanas  
Facultad de Ingeniería, UAQ  
76010 Querétaro, México  
aqualac@uaq.mx

<http://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC>

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Internacional  
para América Latina y el Caribe

10 años