



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



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

# Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

1

**VOL. 13**  
**MARZO 2021**

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental para América Latina y el Caribe  
Journal of the Intergovernmental Hydrological Programme for Latin America and Caribbean



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 marzo 2021

Fotografía de portada: © Eduardo Planos

Lugar: Paseo Santa Lucía, Monterrey, Nuevo León, México.

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](mailto:aqualac@unesco.org)

Centro de Investigaciones del Agua  
Campus Universitario Cerro de las Campanas  
Facultad de Ingeniería, UAQ  
76010 Querétaro, México  
[aqualac@uaq.mx](mailto: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, Haiti

**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

Recientemente se ha incluido como uno de los grandes actores en la gestión de los recursos hídricos, el análisis de las tendencias en la gobernanza global del agua; incluido el derecho al agua. En este contexto se suma la planificación urbana como un elemento que pone en evidencia la atención a los servicios básicos, como el suministro de agua potable y saneamiento. En este número se presenta un trabajo que analiza el impacto de los cambios globales en las ciudades de hoy. La escasez que se provoca dificulta la gestión eficaz de los recursos hídricos. Este trabajo aborda el análisis de las condiciones ambientales y de la forma en que se está desarrollando el área metropolitana de Puerto Príncipe, Haití. En continuación con este tema; otro de los manuscritos de este número, muestra de forma muy detallada un estudio desde el punto de vista ingenieril-hidroológico sobre la caracterización de las potencialidades hídricas de la cuenca del río Sevilla en la provincia Santiago de Cuba. Los conceptos que se muestran permiten conformar un marco de referencia para la realización de futuros planeamientos y reordenamientos de los recursos hídricos. Dos artículos en esta publicación abordan el problema de la escasez hídrica. Se enfocan en la eficiencia de uso del agua de riego. Uno expone la importancia del manejo del riego en la fruticultura como una de las principales labores agrícolas que deben ejecutar los productores en sus predios. Todo en el marco de un paquete de integración de nuevas tecnologías para el control del riego. El otro trabajo relacionado con el tema de riego, continúa con el tema de incorporar tecnologías de riego para facilitar el uso eficiente y sustentable del agua en la agricultura familiar campesina. Se aplican estas tecnologías en pequeños productores de aguacates y cítricos en la región de O'Higgins, Chile. Como una lúcida inferencia en el manejo de agua y de la alta necesidad de tomar en cuenta el derecho al agua; los siguientes dos trabajos abordan temas relacionados con el abastecimiento y saneamiento del agua. Se exhibe el tema del consumo de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales en Nuevo León, México. Se utilizan tres indicadores para el cálculo de su eficiencia: consumo de energía por población equivalente, por kilogramo removido de demanda bioquímica de oxígeno y por metro cúbico tratado. Los resultados permiten ubicar a los procesos de las plantas en estudio, dentro de los índices energéticos óptimos, comparados con otras plantas de tratamiento de tamaño similar. Otro tema de gran importancia en el abastecimiento de agua es sin duda el de las tarifas. El siguiente trabajo presenta, también en México, una crítica de cómo la estratificación de las tarifas de agua potable puede impactar directamente a los usuarios. Evidencias por demás contundentes muestran que existe una relación entre las tarifas, la accesibilidad y la asequibilidad del agua potable para los habitantes de la ciudad de Puebla que viven por debajo de la línea del bienestar. Dentro de estos temas de gestión de recursos surge la imperiosa necesidad de desarrollar estudios sobre eventos extremos producto del clima cambiante. Es así como se publican en este número tres artículos relacionados con eventos extremos. Uno de ellos enfocado al análisis de precipitaciones extremas en las localidades de Resistencia, Barranqueras, Puerto Vilelas y Fontana, Argentina. Las conclusiones de este trabajo permiten llevar adelante el diseño de los planes de contingencia a incluir en un Plan Director de Drenaje Urbano que aún falta desarrollar para esta región. El otro artículo presenta una exhaustiva investigación sobre las intensidades máximas anuales de precipitación para la Región del Maule, Chile. El análisis estadístico reveló que las intensidades máximas de lluvia no muestran tendencias espaciales o temporales. El tercer artículo afronta de manera muy detallada los efectos del proceso hidro-glaciológico actual y futuro de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú. Esta investigación integra procesos hidro-glaciológicos en zona glaciar y no-glaciar, para periodo base 2013 a 2018 y un escenario futuro a 2050. La metodología incluye escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5, utilizando datos diarios de temperatura y precipitación. Un brillante complemento a estos tres artículos sobre fenómenos extremos, es el trabajo que presenta cómo fue implementado el modelo HydroBID en la cuenca Los Padres-Santa Fe, Argentina para analizar el impacto que generan los cambios en el uso del suelo en el balance hídrico. Se examinó la sensibilidad del modelo considerando tres escenarios teóricos y así representar las variaciones debido al cambio de uso de suelo; dando luz de los lugares en donde se deben priorizar medidas de mitigación. Desde nuestro Consejo Directivo y Editorial, ponemos a su consideración este volumen trece de nuestra revista esperando sea, como desde hace diez años, un documento de referencia obligada en nuestra región LAC.

**Dr. Evens Emmanuel**

Vice-Recteur à la Recherche et à l'Innovation  
Université Quisqueya, Port-au-Prince, Haïti

---

---

## CONTENIDO / CONTENTS

Análisis de precipitaciones extremas en el área metropolitana del gran resistencia <i>Extreme precipitation analysis in the Great Resistencia metropolitan area</i> .....	1
Carlos A. Depettris, Jorge V. Pilar, Hugo R. Rohrmann, Marcelo J. M. Gómez [ Artículo de investigación ]	
Paquete tecnológico para la optimización del recurso hídrico en pequeños productores de aguacates y cítricos en Chile Central <i>Technological packages for optimizing water resources in avocado and citrus family farmers in the Central Chile</i> .....	16
Víctor Beyá-Marshall, Brian Baeza, Chris Bustamante, Andrés Ceballos, Estefanía Pizarro, Óscar Seguel, Cristián Kremer, Rodrigo Callejas, Mauricio Galleguillos [ Artículo de investigación ]	
Global water governance and water rights through the prism of Canaan, a slum apart in Haiti <i>La gobernanza mundial del agua y los derechos sobre el agua a través del prisma de Canaán, un barrio marginal de Haití</i> .....	34
Yollette Jérôme, Evens Emmanuel, Pascal Saffache [ Artículo de investigación ]	
Consumo de energía en plantas de tratamiento – Benchmarking <i>Energy consumption in treatment plants – Benchmarking</i> .....	45
Florentino Vázquez A., Kharla Aguilar L., Víctor Villagrana R., Jimmy Loaiza N. [ Artículo de investigación ]	
Discriminación de precios en las tarifas de agua potable en la ciudad de Puebla <i>Price discrimination in drinking water rates in the city of Puebla</i> .....	58
David Alberto Vargas Castro, Agustín López Romero, Delia del Consuelo Domínguez Cuanal, Lilia Varinia Catalina López Vargas [ Artículo de investigación ]	
Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe-Argentina <i>Implementation of the HydroBID model in Los Padres-Santa Fe-Argentina Basin</i> .....	81
Alejandra Arbuét, Graciela Pusineri, Rosana Mazzón, Héctor Hugo Bianchi, Carlos Scioli, Marta Paris, Juliana Corrales, Mauro Nalesso [ Artículo de investigación ]	

---

---

Potencialidades hídricas superficiales de la cuenca hidrográfica del Río Sevilla en el municipio Guamá <i>Surface hydrological potential of Sevilla river watershed in Guamá municipality</i> .....	97
Liber Galbán Rodríguez, Guadalupe Bermúdez Diéguez, Ernesto Ramos Aguilar [ Artículo de investigación ]	
Modelización hidro-glaciológico actual y futura de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú <i>Current and future hydro-glaciological modeling of the Yanamarey microbasin in the Cordillera Blanca, Peru</i> .....	108
Arnaldo Tacsí, Thomas Condom, Javier Garcia, Alejo Cochachin, Abel Mejia [ Artículo de investigación ]	
Paquete tecnológico UchileCrea para el control inteligente del riego en sistemas frutícolas <i>UchileCrea technological package for the intelligent control of irrigation in fruit systems</i> .....	128
Rodrigo Callejas-Rodríguez, Oscar Seguel [ Artículo de investigación ]	
Spatial and temporal behavior of annual maximum sub-hourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile <i>Comportamiento espacial y temporal de las intensidades máximas anuales subhorarias de precipitación para duraciones desde los 15 minutos a 24 horas en Chile Central</i> .....	143
Claudia Sangüesa, Diego Rivera, Roberto Pizarro, Pablo García-Chevesich, Alfredo Ibáñez, Juan Pino [ Artículo de investigación ]	

---





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



Programa  
Hidrológico  
Intergubernamental

## Análisis de precipitaciones extremas en el área metropolitana del gran resistencia

*Extreme precipitation analysis in the Great Resistencia metropolitan area*



Carlos A. Depettris<sup>1\*</sup>, Jorge V. Pilar<sup>1,2</sup>, Hugo R. Rohrmann<sup>1</sup>,  
Marcelo J. M. Gómez<sup>1</sup>.

Recibido: 26/01/2021

Aceptado: 15/03/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

En el año 2019, el Área Metropolitana del Gran Resistencia, conformada por las localidades de Resistencia, Barranqueras, Puerto Vilelas y Fontana, ha soportado precipitaciones extremas durante los meses de enero y abril, cuyas consecuencias fueron inundaciones en numerosos barrios del casco céntrico y de las áreas periféricas, con el consecuente deterioro de la infraestructura urbana y problemas ambientales como la diseminación incontrolada de basura con un colapso del sistema de conducción de líquidos cloacales. La ocurrencia de estos eventos extremos diarios, medidos en la Estación Campus Resistencia de la UNNE, han sido producto de un calentamiento extraordinario de la atmósfera en la región central de Sudamérica desde abril de 2018, un debilitamiento de los sistemas frontales de la región antártica y un sostenimiento del calentamiento superficial del Océano Atlántico, creándose un corredor libre de concentración de humedad en la región. Dadas las condiciones críticas que para la población y la infraestructura se generan en el AMGR ante la ocurrencia de los eventos mencionados, se consideró necesario realizar una estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para una duración diaria aplicando el criterio estadístico de Hershfield, lo que arrojó un valor para el Factor de Frecuencia  $\Phi = 5$ , resultando como consecuencia una PMP diaria de 302.2 mm, monto que debería ser tenido en cuenta para llevar adelante el diseño de los planes de contingencia a incluir en un Plan Director de Drenaje Urbano que aún falta desarrollar para esta región.

**Palabras clave:** lluvias intensas, precipitación máxima probable, Área Metropolitana del Gran Resistencia..

### Abstract

*In 2019, the Great Resistencia Metropolitan Area, made up of the towns of Resistencia, Barranqueras, Puerto Vilelas and Fontana, has endured extreme rainfall during the months of January and April, the consequences of which were floods in numerous neighborhoods, both in the central area and in peripheral areas, with the consequent deterioration of urban infrastructure and environmental problems derived from the uncontrolled dissemination of garbage with a collapse of the sewage system. The occurrence of these extreme daily events, measured at the Campus Resistencia Station of the UNNE, have been the product of an extraordinary warming of the atmosphere in the central region from South America since April 2018, a weakening of the frontal systems of the Antarctic region and a maintenance of the surface warming of the Atlantic Ocean, which created a corridor free of moisture concentration in the region. Given the critical conditions that are generated in the AMGR for the population and infrastructure in the event of the aforementioned events, it was considered necessary to estimate the Probable Maximum Precipitation (PMP) for a daily duration by applying the Hershfield statistical criterion, which yielded a value for the Frequency Factor  $\Phi = 5$ , resulting in a daily PMP of 302.2 mm, an amount that should be taken into account to carry out the design of contingency plans to include in a Drainage Master Plan Urban that still needs to be developed for this region.*

**Keywords:** heavy rains, probable maximum rainfall, Greater Resistencia Metropolitan Area.

1 Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. carlosdepettris@gmail.com ; jvpilar@gmail.com ; hrohrmann@gmail.com ; mgichaco@yahoo.com.ar

2 Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR) constituye el conglomerado urbano más poblado de todo el Nordeste Argentino, estimándose actualmente una población del orden de 413.500 habitantes si se considera el mantenimiento de la última tasa intercensal (INDEC, 2010). La mayor parte del área se sitúa en la planicie de inundación del río Paraná y está atravesada por el cauce del río Negro en el sector norte y los vestigios geomorfológicos del riacho Arazá en la zona sur, lo cual determina una situación de riesgo hídrico que se trata de controlar mediante la polderización del ejido urbano con terraplenes de defensa, complementados con compuertas y estaciones de bombeo. Tales obras de control, ejecutadas entre los años '90 y la primera década del presente siglo, condicionan el sistema de desagües pluviales del AMGR, lo que se suma a una muy baja pendiente del sistema natural, por lo que trasladar excedentes hídricos dentro del área tiene un alto costo para atender la demanda en tiempos compatibles con las necesidades de una gran ciudad. Ante la no concreción de un Plan Director de Drenaje Pluvial para la totalidad del AMGR, cada evento crítico genera incertidumbre respecto a los procedimientos para atender los múltiples problemas que se van sucediendo a medida que se desarrolla la tormenta. Aparece entonces un claro problema de la gestión de la inundación como medida no estructural, la cual debería estar contemplada en el mencionado plan (Chow, Maidment y Mays, 1994).

En el curso del año 2019, el AMGR, conformada por las localidades de Resistencia, Barranqueras, Puerto Vilelas y Fontana (Figura 1), ha experimentado la ocurrencia de precipitaciones extremas durante los meses de enero y abril, cuyas consecuencias derivaron en inundaciones en múltiples sectores del casco céntrico y de los barrios periféricos. El resultado de tales eventos confluyó en graves perjuicios materiales al mobiliario y viviendas, sumado a las ingentes dificultades provocadas al desplazamiento de personas y vehículos durante

varias horas, y de días en algunos sectores más críticos, como asimismo el deterioro de la infraestructura urbana y los problemas ambientales provocados por la diseminación incontrolada de basura con un colapso del sistema de conducción de líquidos cloacales. Los principales eventos de precipitación ocurrieron los días 8/9 de enero, con 237 mm y el día 20 de abril, con 174 mm, según los registros de la Estación Meteorológica que opera el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE en el Campus Resistencia. A su vez el 11 de marzo de 2017 ocurrió un evento que totalizó 198 mm, lo que muestra que en un período de 3 años han ocurrido extremos diarios de singular gravedad para el área urbana involucrada. Dado que los tres eventos tuvieron una duración que no superó las 10 horas y que las lluvias utilizadas para el diseño hidráulico en el AMGR, con recurrencias de 10 años para dicha duración están en el orden de los 160 mm, surge el interrogante de cuál es la verdadera probabilidad de ocurrencia de tales eventos críticos, lo que obligaría a un replanteo de las tormentas de diseño a utilizar en los sistemas de desagüe de las áreas urbanas densamente pobladas de la región (Chow et al., 1994). Desde una óptica estadística, la ocurrencia de un evento crítico de alta recurrencia provocará la disminución de esa recurrencia; lo que, dicho en otras palabras, si un evento crítico ocurrió, aumenta la probabilidad de que se repita, lo cual puede demostrarse con algunos cálculos elementales.

Por otra parte, existe una marcada preocupación por la aparición de eventos cada vez más intensos y de mayor volumen, como lo demuestra la tendencia de los máximos anuales de precipitación diaria del registro correspondiente a los últimos 60 años (1960-2019) para Resistencia, lo que conduciría a tener en cuenta el concepto de Precipitación Máxima Probable (PMP), ya utilizado regionalmente en el estudio de la Obra para Control del Río Negro en Laguna Blanca (Pilar et al., 2000) y que permitiría conjeturar acerca de la variabilidad climática (Romanazzi, 2014).

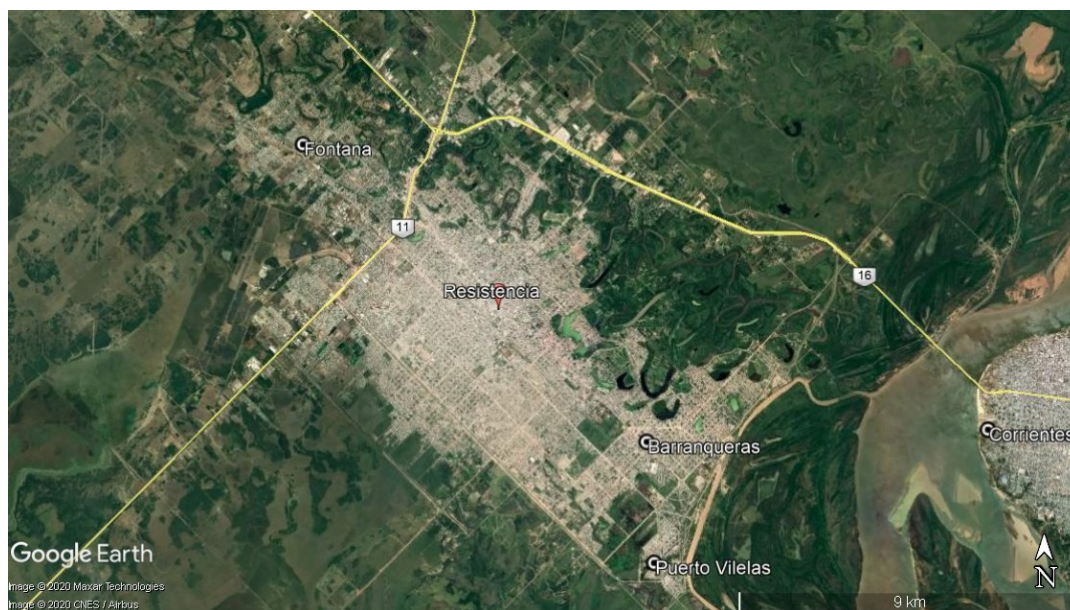


Figura 1. Ubicación de los diferentes municipios del Área Metropolitana del Gran Resistencia. (Fuente: Google Earth, 10/Oct/2020).

Investigaciones recientes sobre eventos hidrometeorológicos extremos consolidan la propuesta metodológica de considerar el valor límite estimado o Precipitación Máxima Probable a partir de la estimación estadística, apoyando la variabilidad temporal del fenómeno en estaciones pluviométricas automáticas y asumiendo que los máximos medidos no ocurren simultáneamente en todos los puntos del área analizada (Flavia Bazzano, 2019). Estudios realizados por investigadores de institutos de la Provincia de Córdoba han demostrado que, para estaciones pluviométricas de zonas húmedas con un promedio elevado de los máximos anuales de precipitación diaria, se produce un aumento del factor de frecuencia  $\Phi_{PMP}$  y de la Precipitación Máxima Probable en la metodología propuesta por Hershfield (Catalini et al., 2014).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. La ocurrencia de lluvias extremas en la región

Las precipitaciones en la región nordeste de la Argentina tienen su máximo en el período que va de octubre a abril y son los denominados Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), que juegan un papel fundamental como generadores de precipitaciones locales intensas. Los fenómenos atmosféricos a escala sinóptica –del orden de un día– pueden provocar procesos convectivos muy

localizados en el espacio. La interacción entre un sistema de baja presión y un frente frío suele ser la causa de lluvias intensas en la región, lo que llega a potenciarse por una fuerte actividad convectiva (Pilar y Depettris, 2000). Las nubes de gran desarrollo vertical, con una extensión superior a los 10 km, evolucionan toda vez que las condiciones de inestabilidad atmosférica son favorables, dando lugar a precipitaciones intensas de corta duración. Cuando las inestabilidades internas de la masa de aire generan condiciones propicias para el desarrollo convectivo –movimiento de ascenso del aire– en los niveles intermedios de la atmósfera, dan lugar a los Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), con una fase inicial que tiene lugar durante las primeras horas de la noche, debido al enfriamiento de los topes de nubes. De ese modo se desarrollan celdas convectivas individuales, que comienzan a interactuar entre sí, conformando un sistema dinámico de mayores dimensiones que las celdas individuales, que se denomina complejo convectivo y que desarrolla su propio ciclo de vida (de 12 a 18 horas), que supera el de las celdas convectivas individuales (hasta 1 o 2 horas). Las imágenes de satélites meteorológicos revelan una estructura espacial de forma aproximada a una elipse con un eje mayor y un eje menor que alcanzan algunas decenas de km, conformando una región dentro de la cual existe una subzona donde la actividad convectiva es más intensa y por lo tanto la precipitación generada

es máxima. Esta detallada descripción de los CCM permite diferenciarlos de las tormentas convectivas aisladas de verano porque producen mayor cantidad de precipitación debido a su mayor extensión en área y a su ciclo de vida más largo (Berry, 2001). Los procesos descritos parecen ser los patrones dominantes de la ocurrencia de las altas precipitaciones registradas en los eventos mencionados.

## 2.2. Tormentas extremas en el AMGR

Los eventos extremos de precipitación que han ocurrido en los últimos años y en particular las intensidades registradas en intervalos de corta duración, parecerían difíciles de ser asociados a una recurrencia o período medio de retorno, dando la impresión de conformar una serie no estacionaria, es decir, con crecimiento de la severidad de las tormentas con el tiempo, (Figura 2) para los últimos 60 años en Resistencia, en registros compilados por el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. En el caso de los eventos mencionados en la introducción de este trabajo, han sido analizados a partir de la reconstrucción de su curva masa con los datos obtenidos del pluviómetro automático a cangilones que opera en la Estación Meteorológica de Capacitación, la cual almacena en

su base de datos los valores precipitados cada 5 minutos.

En estudios anteriores realizados para analizar la variación espacial de las precipitaciones críticas en el AMGR (Depettris et al., 2011) se habían detectado que 7 de los 10 eventos anuales de mayor rigor tuvieron ocurrencia en los últimos 15 años, la mayoría de ellos en la década de los años '90, en coincidencia con las crecidas de los grandes ríos de la región. Si se observa la variable frecuencia de días con tormenta relevada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en el Aeropuerto Resistencia, puede concluirse que a partir de la década del '90 hay un marcado aumento de los días con precipitación registrable ( $> 0.1$  mm) en relación a lo que ocurría en las décadas anteriores (Pérez, 2009). Los valores de la última década procesada (2001-2010) muestran una frecuencia anual de 90 eventos, concentrando 62 de ellos (el 69 %) en el período octubre-abril, mientras que para los 35 años del período 1988/2012 la Estación Meteorológica Campus Resistencia UNNE que opera el Departamento de Hidráulica muestra un promedio de 75 eventos anuales (Ruberto y Depettris, 2013).

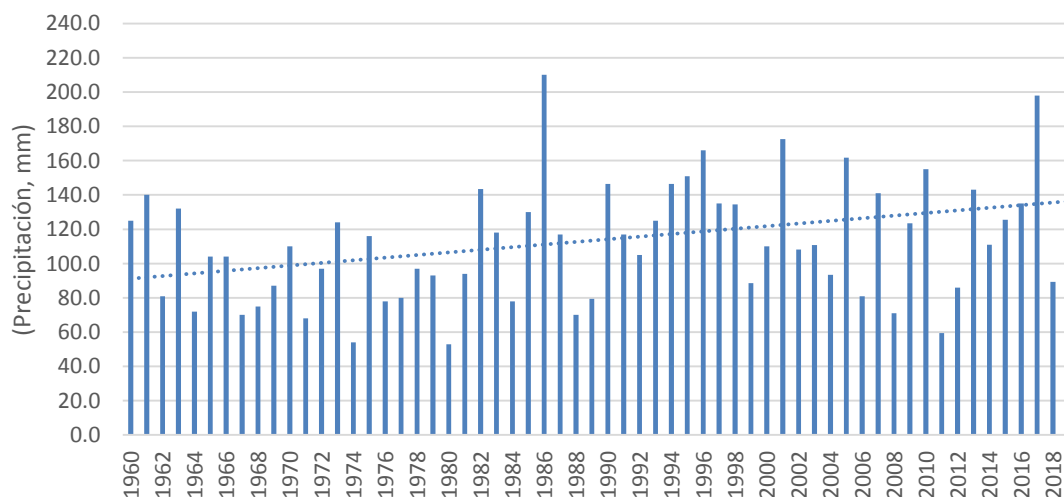


Figura 2. Línea de tendencia de la Precipitación Máxima Diaria para Resistencia

Una consideración de importancia para un análisis de datos diarios y en particular al tratarse de máximos, se presenta alrededor de la hora de medición de la precipitación, ya que en algunos casos la lectura “corta” el evento máximo en dos datos diarios como ocurrió, por ejemplo, los días 2 y 3 de marzo de

2007. Esa situación ha sido considerada con detalle en el período de registro de la Estación Campus Resistencia desde el año de su inicio, en 1988, pero el período anterior (1960-1987) podría contener alguna duda al respecto.

Al analizar la frecuencia de ocurrencia de los eventos máximos diarios para el registro de 60 años en Resistencia, surge claramente un predominio del cuatrimestre enero-abril, en el que se concentra el 68 % de los registros, con una dominancia de los meses de enero y marzo, seguidos de abril y finalmente

febrero, donde su porcentaje se iguala al de noviembre, que domina las ocurrencias sobre el final del año. En la Figura 3 puede verse la distribución de frecuencias absolutas de los 60 valores máximos anuales.

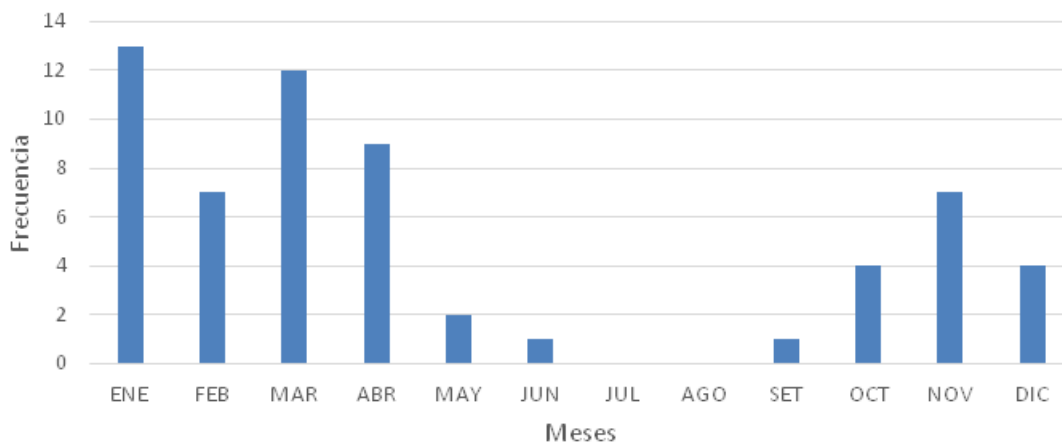


Figura 3. Distribución de frecuencias absolutas de máximos diarios anuales en Resistencia, según el registro de la Estación Meteorológica Campus Resistencia-UNNE.

En el procesamiento de la información para intervalos de lluvias intensas de corta duración son utilizadas las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia procesadas por el equipo de investigadores del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, aplicando el Programa AFMULTI (Paoli, et al., 1991) para la adopción de las funciones teóricas de probabilidad con mejor ajuste y determinando las funciones matemáticas para la representación de las IDF con apoyo del Programa Solver de Excel (Ruberto et al., 2007). Dichas curvas han sido adoptadas oficialmente por la Administración Provincial del Agua del Chaco (APA).

### 2.3. Eventos máximos diarios en estaciones de la región.

Con el objeto de obtener información que permita extender el análisis y disponer de elementos comparativos de los eventos extremos diarios a otros puntos de la región, dando cobertura en particular, además del este del Chaco (con foco en Resistencia), al oeste de la provincia de Corrientes y la franja oriental de Formosa, se procedió a realizar el análisis estadístico de los máximos diarios anuales de precipitación en las siguientes estaciones: Corrientes AERO, Santa Lucía, San Luis del Palmar y Clorinda,

a partir de la información provista por la Base de Datos Hidrológica Integrada que opera la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación para las tres primeras y de la red pluviométrica de la provincia de Formosa para Clorinda. En el caso de esta última, se completó el registro requerido en los últimos 5 años (2015-2019) con los datos de la Estación Puerto Pilcomayo (Formosa), distante 14 km de Clorinda y que forma parte de la Base de Datos ya mencionada.

### 2.4. Aproximación estadística de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para el AMGR.

Dadas las características de los eventos extremos diarios ocurridos en el AMGR en los últimos años, y en particular la frecuencia con que han aparecido en el actual período húmedo (2015-2019), se ha considerado necesario incorporar el análisis de la precipitación máxima probable (PMP), en cuanto ésta se trata de un evento extremo máximo con una probabilidad límite, finita y tendiente a cero, pero no nula de suceder, por lo que carecería de sentido práctico querer asociarla a una recurrencia determinada (Caamaño Nelly et al., 2003). En base a los datos disponibles en nuestra región, aparece más conveniente recurrir a los métodos estadísticos de estimación de la PMP. En este trabajo se siguió el criterio enunciado por Hershfield (Hershfield, 1961),

que se basa en minimizar la probabilidad de ocurrencia de una tormenta, maximizando el factor

$$y = \mu_y + \Phi_y \cdot \sigma_y \quad (1)$$

donde “y” es la variable aleatoria, “μ” y “σ” la media y el desvío estándar de esa variable aleatoria y “Φ” el factor de frecuencia. Según el criterio de Hershfield, se puede suponer que cuando la precipitación tienda a

de frecuencia de la ecuación general propuesta por Chow (Tucci, 1997; Linsley et al., 1988):

su límite superior (la PMP), ese valor superará a la media en una cierta cantidad de veces el desvío estándar. Entonces:

$$PMP = \mu_y + \Phi_{PMP} \cdot \sigma_y \quad (2)$$

Entonces, el valor “Φ<sub>PMP</sub>” podría estimarse a partir de los registros disponibles, tomando el máximo valor

de los “n” registros, excluyéndolo de la serie y determinando el “Φ<sub>n-1</sub>” de los “n-1” restantes:

$$P_{MÁX} = P_{med;n-1} + K_{n-1} \cdot S_{n-1} \quad (3)$$

donde “P<sub>MÁX</sub>” es el valor máximo de la serie de “n” precipitaciones diarias máximas anuales, “P<sub>med;n-1</sub>” y “S<sub>n-1</sub>” la media y el desvío de la serie de “n-1” valores, excluyendo el valor “P<sub>MÁX</sub>”, y “K<sub>n-1</sub>” el valor que satisface matemáticamente la ecuación (2) y que, según lo explicado, sería una estimación del valor de “Φ<sub>PMP</sub>”. Continuando con el mismo razonamiento, en este trabajo también se calcularon los valores de “K<sub>n-</sub>

2”, “K<sub>n-3</sub>”, etc., tomando siempre como referencia la P<sub>máx</sub> de la serie, buscando detectar si existía alguna tendencia en el comportamiento del valor de Φ a medida que “n-i” disminuye (o sea, “i” aumenta). Para el presente trabajo, el proceso de cálculo se realizó para truncamientos de la serie original hasta excluir todos los valores máximos que cumplieran la condición siguiente:

$$P_{max} \geq P_{media_n} + S_n \quad (4)$$

Respecto al valor del factor de frecuencia “Φ” encontrado en trabajos específicos, se observa una gran dispersión: por citar solo algunos, mientras Hershfield estimó ese valor en 15, otros investigadores de Sudamérica (Tucci, 1997) han propuesto valores más bajos, del orden de 5 a 10 veces el desvío estándar de la media histórica, mientras que la Organización Meteorológica Mundial (1983) propone una expresión para las lluvias más intensas registradas en el mundo en función de la duración del evento en horas que resulta en valores extremadamente elevados. Es evidente que en este último caso se están considerando en un mismo análisis climas muy diversos del planeta, en particular los eventos de climas monzónicos, que corresponden a los mayores valores registrados, para lo cual la expresión de la OMM representaría una suerte de “techo” para cualquier estimación de la PMP.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Tormenta del 11 de marzo de 2017.

El evento extremo ocurrido el sábado 11/03/2017 se inició a las 1:55am y finalizó a las 11:05am, con un total precipitado de 198 mm, pero concentrando el mayor volumen entre las 4:35am y las 6:50 am, por lo que en 2 horas y 15 minutos (135 minutos) cayeron 160 mm, que representa una intensidad promedio de 71 mm/h y un período de intensidad máxima de 103.4 mm/h que se sostuvo durante 80 minutos. El 70 % del AMGR quedó bajo agua con anegamientos de diferente magnitud, que en las zonas más bajas alcanzó alturas de hasta 50 cm sobre las veredas, mientras que un gran sector del casco céntrico alcanzó alturas del orden de 10 a 15 cm, dificultando el tránsito vehicular y peatonal (Figura 4), con anegamiento de calles en el sector céntrico de Resistencia como consecuencia de la tormenta ocurrida, que determinó el establecimiento de emergencia en el tránsito por parte del Municipio local. El escurrimiento hacia las vías principales de desagüe se vio impedido por el gran volumen precipitado, que generó efectos de remanso por la insuficiencia de conducción del sistema existente.



Figura 4. Anegamiento de calles en el sector céntrico de Resistencia como consecuencia de la tormenta ocurrida el 11 de marzo de 2017, (Fuente: [www.diarionorte.com](http://www.diarionorte.com), con autorización para su publicación).

En la Figura 5 se muestra la evolución del milimetraje acumulado durante la tormenta, a través

de la curva masa del pluviómetro automático del Campus UNNE.

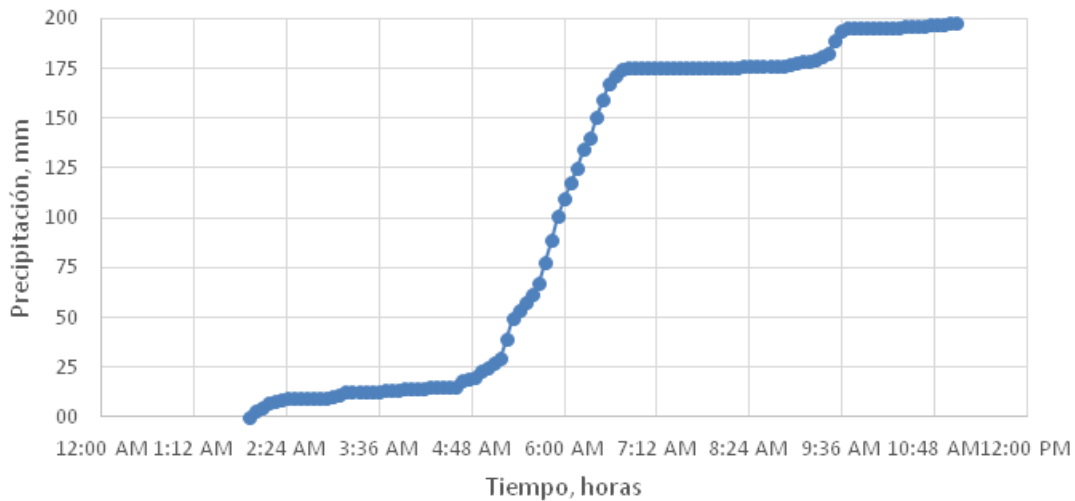


Figura 5. Precipitación acumulada durante el evento del 11/03/17, pluviómetro automático del Campus Resistencia-UNNE

### 3.2. Ocurrencia de tormentas en 2019.

La ocurrencia de eventos de precipitación durante los primeros meses del año 2019 muestra una frecuencia normal para el período otoñal, pero no así en los montos precipitados, y esa anomalía se remonta al

mes de abril de 2018, que según los registros meteorológicos de la ciudad de Resistencia fue el más caluroso en 60 años, lo que generó condiciones para el inicio de un período anual extraordinario de gran disponibilidad de humedad en la atmósfera en

toda la región central de Sudamérica (Boletín Climatológico, Servicio Meteorológico Nacional, abril 2018). Asimismo, se presenta un debilitamiento de los sistemas frontales provenientes de la región antártica, dejando lugar a un predominio de masas frías provenientes del Océano Pacífico Sur con buen contenido de humedad y muy lento desplazamiento. Ello dio como resultado la aparición de numerosas celdas de tormenta de escaso desplazamiento y gran volumen de humedad, donde la mayor parte de la energía incorporada se invierte en lluvia, ya que han sido escasas las situaciones de vientos fuertes. Por otra parte, el Océano Atlántico continuó con temperaturas cálidas en superficie, lo que sumado al debilitamiento de los frentes subpolares, han generado en la zona centro-sur de Sudamérica un corredor libre de humedad sometida a ascensos forzados por las suaves pendientes que separan las masas frías de las cálidas, contribuyendo al desarrollo vertical de nubes convectivas de buen volumen, conformando el siguiente patrón: mes con más de una quincena de lluvias abundantes seguido de mes y medio a dos meses de lluvias normales a escasas y luego otro mes con lluvias abundantes. Este

comportamiento no solo afectó al Chaco sino también al centro y norte de Argentina, todo el Paraguay, centro y este de Bolivia y todo el este-sudeste brasileño, conformando lo que se denominan “Sistemas Convectivos de Mesoescala” (SCM), formados por un conjunto de tormentas puntuales y con características muy diferentes al entorno, como un proceso de “tropicalización” cada vez más común en nuestra zona (Lic. Julio C. Ríos, comunicación personal). En el contexto descrito se produjeron sobre el AMGR los eventos del 8/9 de enero y del 20/abril, ambos de 2019, totalizando en los registros del Campus Resistencia-UNNE 237.0 mm y 174.0 mm respectivamente, constituyendo el primero de ellos el máximo registro diario en 60 años, mientras que el segundo se ubicaría en el cuarto lugar de no haber ocurrido en el mismo año. El evento de enero tuvo una duración total de 14 horas y 35 minutos, tiempo que en realidad involucra dos tormentas intensas, la primera de ellas durante la noche del 8 de enero con una duración de 2 horas y 45 minutos, y la segunda en la madrugada del día 9 con una duración de 3 horas y 15 minutos (3.58 horas), como puede observarse en el hietograma de la Figura 6.

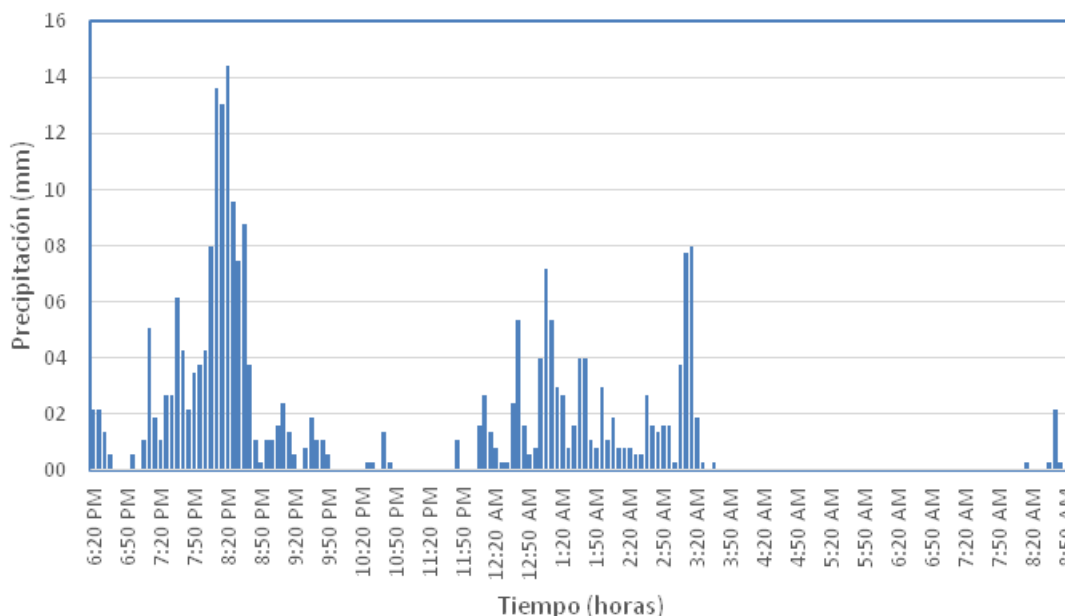


Figura 6. Hietograma de la tormenta registrada entre la noche del día 8 y la mañana del día 9 de enero de 2019 en el Campus Resistencia de la UNNE.

Dichas tormentas se desarrollaron en un total de 9 horas, que incluye una interrupción de 2 horas casi sin lluvia, y con un período de mayor intensidad entre las 19:10 y las 20:35, en el que precipitaron 107.2

mm, con una intensidad de 75.7 mm/h y uno de máxima intensidad entre las 20:00 y las 20:35 con agua caída de 74.9 mm y una intensidad de 128.4 mm/h (Figura 7).



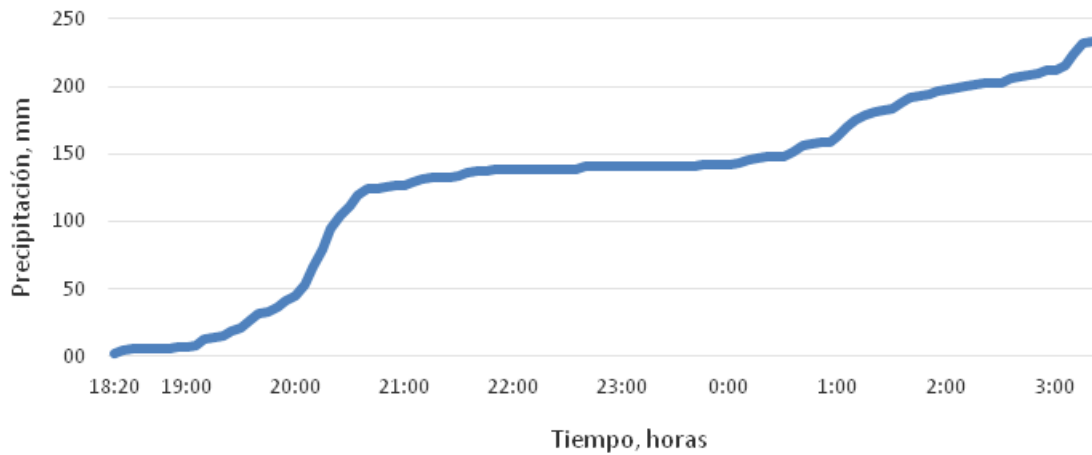


Figura 7. Precipitación acumulada durante el evento del 8 al 9/enero de 2019, registrado por el pluviómetro de la Estación Meteorológica Automática (EMA) del Campus Resistencia UNNE que opera el Departamento de Hidráulica.

El evento ocurrido el sábado 20 de abril de 2019, si bien con una precipitación total bastante menor al evento analizado anteriormente, con 174.0 mm, ocurrió principalmente entre las 7:15 y las 9:30, o sea 2 horas 15 minutos (2.25 horas) en las que llovieron 152.3 mm (88 % del total), lo que representa una intensidad de 67.8 mm/h, que excede el TR de 50 años de las curvas IDF actualmente disponibles para Resistencia.

En la Figura 8 puede observarse la concentración temporal del evento mencionado, lo cual marca una diferencia de montos con la registrada el 8/9 de enero en periodos similares, aun considerando el momento del evento mayor en esta última. Asimismo, la curva masa del pluviógrafo también da la pauta del volumen de precipitación más concentrado para el 20/abril (Figura 9).

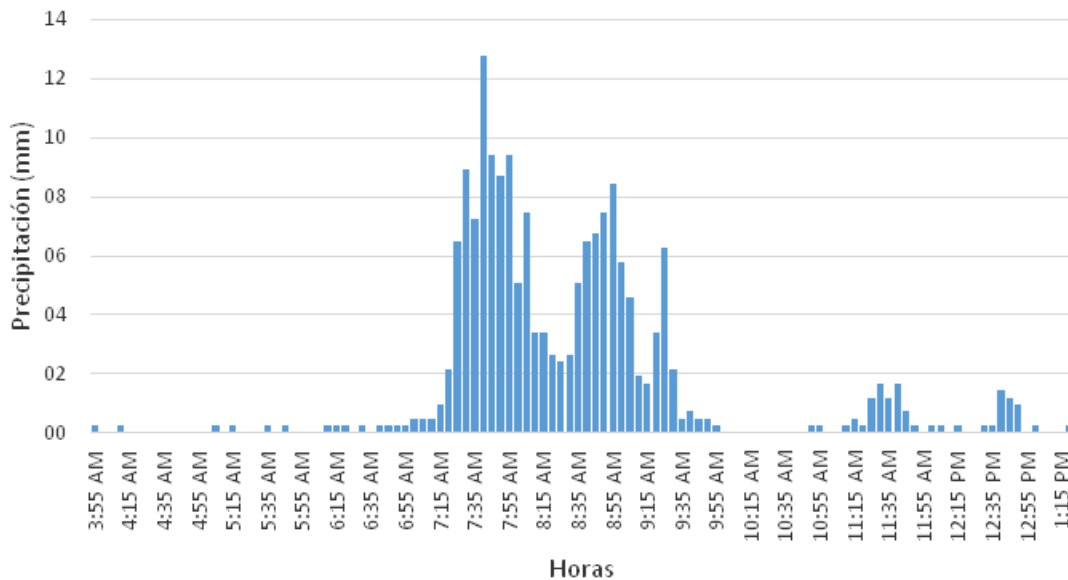


Figura 8. Hietograma de la precipitación ocurrida el sábado 20 de abril en Resistencia, en base al registro de la EMA del Campus Resistencia-UNNE.

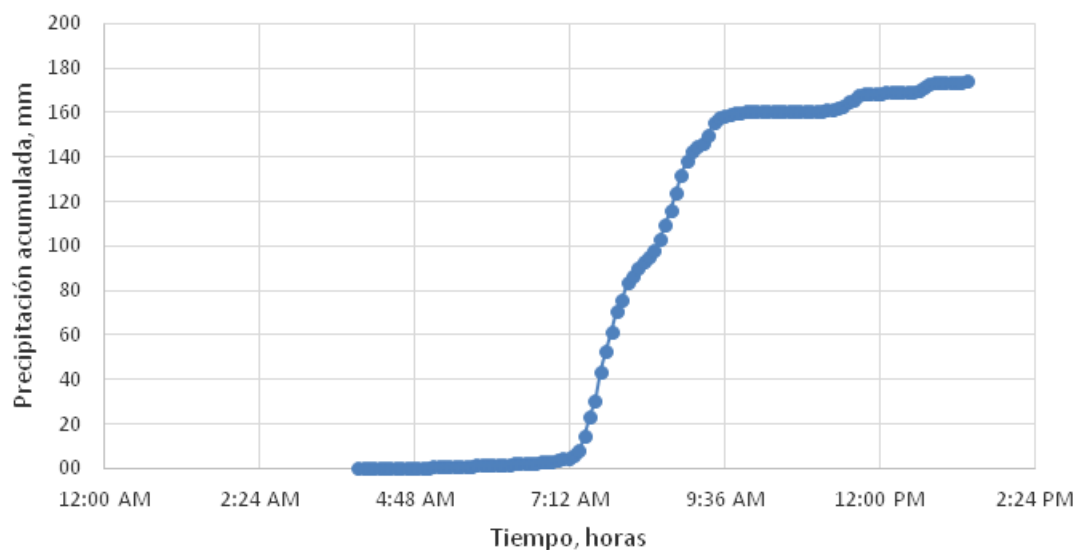


Figura 9. Precipitación acumulada para el evento ocurrido el sábado 20 de abril, según el registro de la EMA del Campus Resistencia-UNNE.

Las isohietas representativas del evento muestran las características claramente convectivas del mismo, con altos milimetrajés en una superficie reducida, donde las precipitaciones superiores a los 150 mm abarcaron un área aproximada de 80 km<sup>2</sup> con un pico de precipitación de 200 mm medido por el Sistema Automático de Telemedición (SAT) en la Administración Provincial del Agua, en cercanías de la intersección entre la Autovía Nicolás Avellaneda y

Avenida Sarmiento. En la Figura 10 se muestra la cobertura del fenómeno, donde a 13 km (Puerto Tirol) y a 10 km (Colonia Benítez) del epicentro los valores de lluvia alcanzaron registros de 45 y 66 mm, respectivamente.

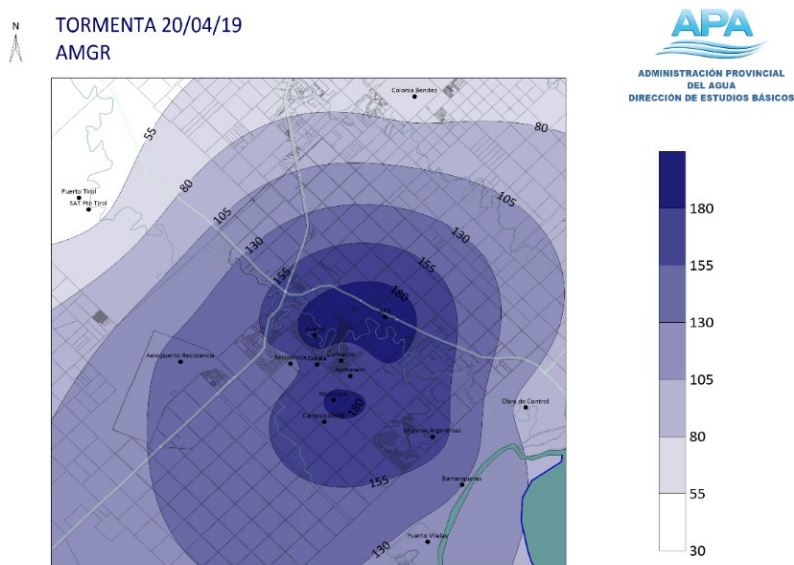


Figura 10. Isohietas del evento ocurrido el sábado 20 de abril sobre el AMGR (Fuente: Dirección de Estudios Básicos de la APA).

Los valores de precipitación de las tormentas analizadas de enero y abril de 2019 fueron similares, siendo ligeramente mayor en abril, pero mientras las intensidades de precipitación de enero fueron similares a las utilizadas en el diseño (inferiores o del orden de los 10 años), las ocurridas en abril fueron muy superiores a las de diseño, según puede observarse en las láminas acumuladas para diferentes TR (Orsolini et al., 2008), según las curvas I-D-F adoptadas por la Administración Provincial del Agua del Chaco – APA (la máxima autoridad hídrica provincial, responsable, entre otras cosas, de mantener actualizadas dichas curvas), para el AMGR, al compararlas con el registro correspondiente a una

estación no oficial, operada por un particular, ubicada en Av. Ávalos, en la zona del hipermercado Carrefour (Figura 11). Resulta evidente que, a partir de los tres eventos extremos analizados, ocurridos en los últimos tres años, se impone una necesaria actualización de la información para el trazado de las curvas IDF, de modo de reajustar los valores de probabilidad de ocurrencia a las situaciones reales mencionadas. Esto es así dado que las curvas que son actualmente utilizadas han sido ajustadas con la información disponible hasta el año 2005 (Ruberto et al., 2007), por lo que hay 14 años de datos que deben ser incorporados en el análisis.

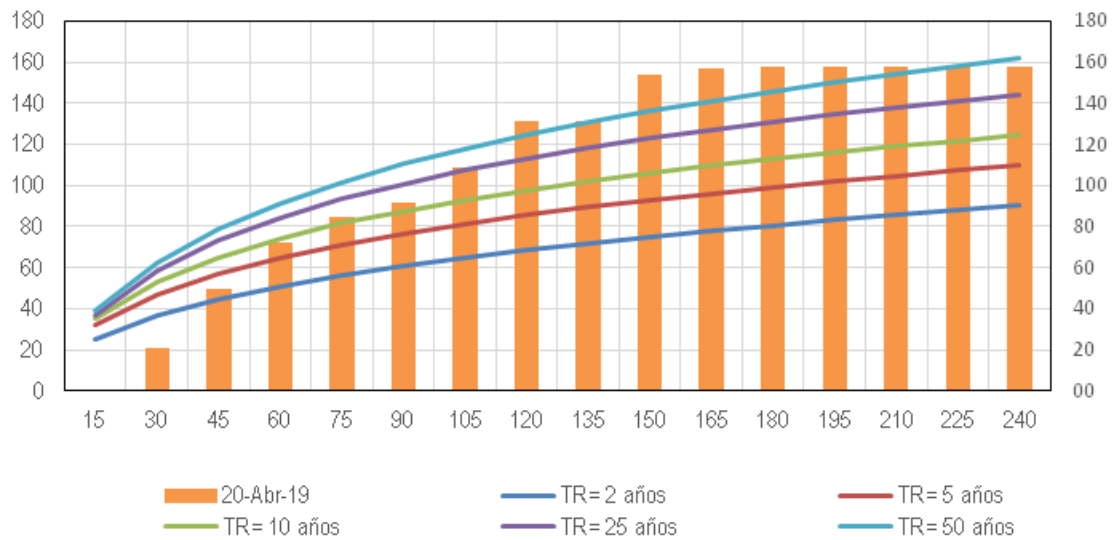


Figura 11. Láminas de precipitación (en mm) para diferentes TR comparadas con el hietograma del evento del sábado 20 de abril, según los registros de la Estación Zabala, en Avenida Ávalos, zona Carrefour.

### 3.3. Máximos diarios en estaciones de la región.

Si bien la extensión de las series disponibles de las estaciones seleccionadas para Chaco, Corrientes y Formosa es diferente, todas abarcan al menos tres décadas de información y están actualizadas al año 2019, por lo que se puede considerar que es un

análisis dentro de la serie que podría denominarse “moderna”, conteniendo por lo tanto el registro de los eventos extremos que se pretende analizar. Las estadísticas de los registros de esas estaciones son mostradas en la Tabla 1. Las mismas se obtuvieron utilizando programa AFMULTI (Paoli, et al., 1991).

Tabla 1. Síntesis de los estadísticos principales para la serie de máximos diarios anuales, en cinco estaciones pluviométricas de la Región Nordeste

Estación	Registro (años)	Media (mm)	Desvío (mm)	Asimetría	Valor extremo (mm)
Resistencia	60	113.7	37.71	0.89	237.0
Corrientes	38	153.1	46.54	0.94	307.0
Santa Lucía	51	111.7	43.53	0.53	217.0
San Luis del Palmar	34	129.6	42.19	0.23	215.0
Clorinda	53	101.1	34.54	1.32	228.0

La primera observación de interés es que los valores extremos diarios de cada serie superan los 200 mm en todos los casos, pero en Corrientes alcanzaron a 307 mm, superando en 70 mm a la estación de orden siguiente, Resistencia, siendo que la distancia entre los aparatos de registro en ambas es de 22 km, lo que da una pauta de la concentración de los eventos convectivos asociados con situaciones extremas (Figura 10). Ese valor máximo determina que resulte Corrientes la de valores mayores en los estadísticos “media” y “desvío estándar”, posicionándose en segundo lugar por su asimetría positiva, pero como consecuencia que San Luis del Palmar presenta un único extremo superior a 200mm, caso que no se repite en las demás estaciones. Aquí también cabe destacar que la distancia entre Corrientes y San Luis del Palmar es de sólo 21,5 km, estando esta última ubicada al este de la Capital provincial.

### 3.4. Evento máximo probable para Resistencia.

Al aplicar el procedimiento descrito en el apartado 2.4, tomando los valores extremos de cada serie,

utilizando la media y desvío estándar presentadas en la Tabla 1, se puede observar que el valor máximo del factor de frecuencia (K) correspondió a la serie de Clorinda, que fue 3.7, mientras que para las series de Resistencia y Corrientes fue 3.3. Como se explicó en el mencionado apartado 2.4, también se calcularon los valores de “ $\Phi_{n-2}$ ”, “ $\Phi_{n-3}$ ”, etc., tomando siempre como referencia la  $P_{máx}$  de la serie. El truncamiento explicado en la ecuación (4), para la serie de 60 años para Resistencia correspondió a 151,6 mm, siendo 7 los valores extremos que cumplen esa condición. Al tratarse de una serie con asimetría positiva, o sesgo hacia los valores máximos de la muestra, el considerar los mencionados 7 valores extremos, da una pauta bastante sólida para la adopción del factor de frecuencia para la PMP, siempre en el sentido de maximizar el resultado final. En la Figura 12 se puede observar que ese procedimiento muestra como tendencia que el valor del factor de frecuencia no supera la magnitud de  $\Phi = 5$ , por lo que al aplicarlo se obtiene una PMP para eventos de 1 día de duración, para Resistencia, de 302.2 mm.

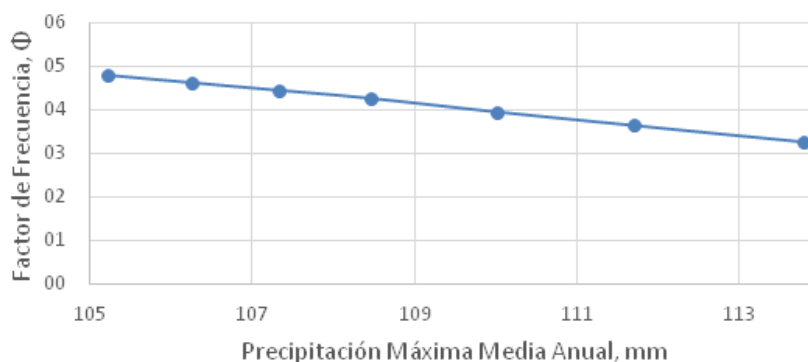


Figura 12. Tendencia del Factor de Frecuencia de Hershfield en función de la Precipitación Máxima Media Diaria para Resistencia, Estación Campus Resistencia-UNNE.

#### **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Si bien el valor de PMP obtenido parece tener una aceptable razonabilidad en función de los datos observados en los 60 años de registro, no puede dejar de mencionarse que en la región se han registrado precipitaciones extremas diarias del orden (o superiores a) de 300 mm, en la Estación Corrientes Aero (307 mm, abril de 1983), en Goya (313 mm, abril 1998), todos ellos registros disponibles en la página del Servicio Meteorológico Nacional ([www.smn.gob.ar](http://www.smn.gob.ar)) y en el año 2019, la Policía del Chaco informó un valor extremo en Enrique Urien, de 340 mm, el domingo 5 de mayo (registros disponibles en [policia.chaco.gov.ar](http://policia.chaco.gov.ar)), por lo cual el valor calculado para el AMGR, de 302.2 mm, debe tomarse como una estimación de la PMP, con la precaución que indican los valores superiores recién mencionados. El máximo valor de factor de frecuencia para la estimación de la PMP obtenido en los análisis realizados en el contexto del presente trabajo fue 5, que aparece como un valor razonable para la región NEA. Los valores superiores de ese factor de frecuencia sugeridos en algunas publicaciones (Tucci, 1997) corresponden a otras regiones y latitudes, inclusive a promedios globales que abarcan fenómenos de génesis diferentes. Con la información disponible, se podría concluir que para la región NEA el valor 5 para el factor de frecuencia sería adecuado. Esa afirmación es razonable, teniendo en cuenta, por ejemplo, que las tablas para estimar el equivalente a ese factor de frecuencia para distribuciones de probabilidades de valores extremos, como por ejemplo la distribución Log-Pearson III (basada en la distribución general de Chow, con la aproximación de Kite, 1977), no muestran valores superiores al sugerido.

#### **5. CONCLUSIONES**

Los eventos extremos de precipitación que ocurren en el AMGR y que caracterizan actualmente a la hidrometeorología de la región Nordeste de Argentina están insertos dentro de los denominados Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), que juegan un papel determinante en su génesis. La ocurrencia de los eventos extremos de un día de duración que se produjeron entre los meses de enero y abril del año 2019, y que por su magnitud ocupan las posiciones 1 y 4 entre los máximos de los últimos

60 años, son producto de un calentamiento extraordinario de la atmósfera en la región central de Sudamérica desde abril de 2018, un debilitamiento de los sistemas frontales de la región antártica y un sostenimiento del calentamiento superficial del Océano Atlántico, lo que creó un corredor libre de concentración de humedad en la región. El análisis en particular del evento ocurrido el sábado 20 de abril de 2019, que concentró el 88 % del total precipitado en 135 minutos, de un modo tal que las láminas de lluvia acumulada para las duraciones comprendidas entre 2 y 3 horas muestran tiempos de recurrencia superiores a los 50 años, según las curvas IDF vigentes para el AMGR, son un indicio de la necesidad de una actualización de esas curvas y, además, los últimos 14 años de datos pluviográficos aún no han sido incorporados a esa herramienta de diseño hidrológico e hidráulico. Por otra parte, haciendo un análisis geográficamente más amplio, que abarque otras estaciones de registro de la región, aparecen valores puntuales singulares, que modifican sensiblemente las estadísticas de las últimas décadas, destacándose la Estación Corrientes Aero, que vio afectada su media por la tormenta de 307 mm. Esto estaría demostrando la forma altamente concentrada en la que se producen los eventos convectivos extremos, ya que la distancia de esta última con otras dos de las estaciones analizadas (Resistencia y San Luis del Palmar) no supera los 22 km. Resulta absolutamente necesario que se promueva la continuidad de lecturas sistemáticas en las estaciones pluviométricas y pluviográficas del AMGR, se garantice un eficiente procedimiento técnico para la lectura de cada evento intenso, con un adecuado mantenimiento del instrumental utilizado y, en la medida de lo posible, se aumente la densidad de puntos de observación para conocer mejor la extensión superficial de las celdas convectivas. Dadas las condiciones críticas que para la población y la infraestructura se generan en el AMGR ante la ocurrencia de eventos como los analizados, se consideró necesario realizar una estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) para una duración diaria aplicando el criterio estadístico de Hershfield, lo que arrojó un valor para el Factor de Frecuencia  $\Phi = 5$ , resultando como consecuencia una PMP diaria de 302.2 mm, monto que debería ser tenido en cuenta para llevar adelante el diseño de los planes de contingencia en situaciones hídricas de inundación.

## REFERENCIAS

- Bazzano, Flavia (2019); “Predicción de lluvias máximas para diseño hidrológico. Desarrollo experimental en la Provincia de Tucumán”. Tesis para acceder al grado de Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Berry, G.J. (2001); “Hidrometeorología de las inundaciones en la Argentina y en el AMBA”, Editores: Kreimer, Kullock, Valdés, The World Bank, Washington, D.C.
- Caamaño Nelly, G., Dasso, C., García, C., (2003); “Lluvias de diseño: conceptos, técnicas y experiencias”, Editorial Científica Universitaria, Córdoba, Argentina.
- Catalini, C., García Rodríguez, C., Caamaño Nelly, G., Ordóñez, S. (2014); “Regionalización paramétrica y valores límites estimados en la Región Central Argentina”. IV Taller de Regionalización de precipitaciones máximas. UNT, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1994); “Hidrología aplicada”, Mc Graw-Hill Interamericana, Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- Depettris, C. A., Rohrmann, H. R., Kutnich, E. J., Parini, P. I., (2011); “Análisis de la variación espacial de precipitaciones críticas en el AMGR”, XXIII Congreso Nacional del Agua, Resistencia, Chaco, Argentina.
- Hershfield, D. M. (1961); “Estimating the probable maximum precipitation”. Proceedings American Society of Civil Engineers, Journal Hydraulics Division, 87 (HY5).
- INDEC (2010); “Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010”. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-3-6-22-140-20100>
- Kite G.W. (1977); “Frequency and Risk Analyses in Hydrology”, Colorado, USA, Water Resources Publications, Fort Collins.
- Linsley, R., Kohler, M., Paulus, J. (1988); “Hidrología para ingenieros”, 2ª Edición. Cap. 11, Probabilidad en Hidrología: una base para diseño. McGraw Hill Interamericana, México.
- Paoli, C. U., Bolzicco, J., Cacik, P. (1991); “Análisis de frecuencia para la determinación de la crecida de diseño”, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.
- Pérez, M. E., (2009); “El comportamiento témporo-espacial de los montos anuales de precipitación en el Nordeste Argentino”, Revista Geográfica Digital IGUNNE, Facultad de Humanidades-UNNE, Resistencia, Chaco, Argentina.
- Pilar, J. V., Depettris, C. A. (2000); “Análisis de una lluvia intensa real”, Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina.
- Pilar, J. V., Depettris, C. A., Broner, S. J., (2000); “Estimación de PMP en la Cuenca del río Negro (Chaco)”, XVIII Congreso Nacional del Agua, Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina.
- Orsolini, H., Zimmermann, E., Basile, P., (2008); “Hidrología. Procesos y métodos”, Cap. IX. Estadística Hidrológica. UNR Editora de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
- Romanazzi, P. G., (2014); “Aproximación a la estimación estadística de la Precipitación Máxima Probable para La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina”, II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fé, Argentina.
- Ruberto, A., Depettris, C. (2013); “Estación meteorológica de capacitación. Publicación Didáctica N° 3. 25 años:1988-2012”, Departamento de Hidráulica de la FI-UNNE. Imprenta de la Secretaría General de Extensión Universitaria de la UNNE. ISSN 1852-5806. Resistencia Chaco, Argentina).
- Ruberto A., Gabazza S., Kutnich J., Depettris C., Pilar J. (2007); “Actualización y análisis de las curvas IDF en el Área Metropolitana del Gran Resistencia”. Actas del XXI Congreso Nacional del Agua. San Miguel de Tucumán, Argentina,

Servicio Meteorológico Nacional (2018); “Boletín climatológico – Volumen XXX – N° 4- Año 2018”. ISSN 2314 2332. Ministerio de Defensa, Presidencia de la Nación. Buenos Aires, Argentina.

Tucci, C.E.M. (1997); “Hidrología, Ciencia y Aplicación”, 2ª edición, Porto Alegre. Editora Da Universidade/UFRGS, ABRH.

*Como citar este artículo:*

Depettris, C. et al., (2021). Análisis de precipitaciones extremas en el área metropolitana del Gran Resistencia. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 1-15.  
doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-01



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

## Paquete tecnológico para la optimización del recurso hídrico en pequeños productores de aguacates y cítricos en Chile Central

*Technological packages for optimizing water resources in avocado and citrus family farmers in the Central Chile*

Víctor Beyá-Marshall<sup>1</sup>, Brian Baeza<sup>1</sup>, Chris Bustamante<sup>1</sup>, Andrés Ceballos<sup>1</sup>  
Estefanía Pizarro<sup>1</sup>, Óscar Seguel<sup>1</sup>, Cristián Kremer<sup>1</sup>, Rodrigo Callejas<sup>1</sup>, Mauricio Galleguillos\*<sup>1</sup>

Recibido: 12/02/2021

Aceptado: 18/03/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

En un contexto de cambio climático con menor disponibilidad de agua, resulta relevante incorporar tecnologías de riego que facilitan el uso eficiente y sustentable del agua en la agricultura familiar campesina (AFC). Por ello, se aplicó una metodología de estimación del tiempo y frecuencia de riego, utilizando tecnologías para el seguimiento del estado de la vegetación, la humedad de suelo y el diagnóstico físico de los suelos. Esta metodología se aplicó durante tres temporadas en huertos de aguacate y cítricos de 40 productores pertenecientes a la AFC de la región de O'Higgins, incorporando un fuerte componente de transferencia tecnológica. Los resultados indican que la principal limitante productiva, desde el punto de vista físico del suelo, correspondió al bajo nivel de poros gruesos ( $>50 \mu\text{m}$ ), los cuales no superaron el 15% en el 60% de los casos, y, sumado a un ineficiente manejo del riego (sistemas de riego con baja mantención y erróneas prácticas de riego), ha limitado la productividad de estos frutales. Se logró un ahorro en el uso de agua de riego en el 96% de los productores, con una reducción promedio del consumo de agua de un 34% (3,221 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> temporada). Esto permitió un aumento de la eficiencia del uso del agua de riego, una reducción del consumo eléctrico y un aumento monetario del uso de agua entre un 17% a 35%, dependiendo del parámetro, con respecto al manejo tradicional. Se concluye que el paquete tecnológico propuesto redujo considerablemente la brecha tecnológica en la AFC, optimizando así el recurso hídrico.

**Palabras clave:** Sonda de capacitancia, estado hídrico de suelo y planta, eficiencia en el uso del agua, teledetección, telemetría, agricultura familiar campesina.

### Abstract

*In a climate change scenario with less water availability, it becomes relevant to incorporate a technology that facilitates the efficient and sustainable use of water. To do this, was applied a methodology to estimate the time and frequency of irrigation using technologies that monitor the vegetation health (spatial and temporal), soil moisture, and assess the physical properties of the soil. This method was applied, during three seasons, in small-scale avocado and citrus orchards of 40 farmers in the O'Higgins region, with a strong technological transfer component. The results indicate that the main causes of low crop yields, regarding to the soil properties, corresponded to the low amount of coarse pores ( $> 50 \mu\text{m}$ ), which did not exceed 15% in 60% of the cases, in addition to an inefficient irrigation management (poor irrigation systems maintenance and practices), has largely limited the productivity of these crops. Water savings were achieved in 96% of the producers, with an average reduction in water consumption of 34% (3,221 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> per season). This allowed an increase in irrigation water use efficiency, a reduction in electricity consumption and an increase in water productivity, depending on the parameter, between 17% to 35% with respect to traditional management. It was concluded that the proposed technological package can considerably reduce the technological gap of the small producers, thus, optimizing the water resources.*

**Keywords:** capacitance probes, soil and plant water status, water use efficiency, remote sensing, telemetry, family farmers.

<sup>1</sup> Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Centro de Regional de Estudios Agronómicos UCHILECREA. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile. mgalleguillos@renare.uchile.cl



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

En los últimos diez años, Chile se ha enfrentado a una sequía extensa y prolongada, la cual ha limitado la producción agrícola, principalmente en la zona centro y norte del país (Garreaud *et al.*, 2017; 2020) y, de acuerdo con las proyecciones de cambio climático, todo indica que el déficit será más profundo en el futuro, siendo Chile Central particularmente afectado (Bozkurt *et al.* 2018). En este sentido, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), principal institución gubernamental de apoyo a la pequeña agricultura, ha fomentado la incorporación de diversas técnicas y sistemas de riego tecnificado, con miras a ser más eficientes en el uso del recurso hídrico. No obstante, para lograr una adecuada adaptación frente a los escenarios adversos, se requiere conjugar esfuerzos en diversas dimensiones, en especial para la agricultura familiar campesina, al ser un sector vulnerable a la escasez hídrica. En Chile, al igual que en el resto de América Latina, la agricultura familiar campesina (AFC) es un segmento social y económico de gran importancia, ya que representa un universo del orden de las 260,000 explotaciones, equivalentes a casi el 90% del total de unidades productivas del país (ODEPA, 2017). La realidad de estos productores indica que existe una alta brecha tecnológica entre agricultores, quienes difieren en el acceso a información y tecnología, siendo usualmente el factor limitante el costo, lo que atenta contra las posibles mejoras de su competitividad. A su vez, la mayoría de los productores de la AFC poseen una edad avanzada, por lo que incorporar tecnología y herramientas nuevas es un desafío mayor. En este sentido, el desarrollo de una investigación e innovación participativa con los diferentes actores podría asegurar una mejor transferencia de la tecnología.

En la Región de O'Higgins, ubicada en Chile Central, la producción de aguacate (palto) y cítricos ha sido uno de los tradicionales y principales rubros de las comunas de Peumo, Las Cabras, San Vicente de Tagua Tagua y Pichidegua, donde la mayor parte de la superficie pertenece a productores pequeños y de subsistencia, que abastecen al mercado interno y, a su vez, son fuente de empleo agrícola del sector (ODEPA-CIREN, 2018). Sin embargo, las metodologías de control del riego utilizadas por estos agricultores son nulas o presenta altos grados de ineficiencia; entre estas metodologías se destaca: la

observación de calicatas y la determinación subjetiva del contenido de agua en el suelo al tacto (Callejas *et al.*, 2014a). A su vez, gran parte de los huertos están ubicados sobre suelos de clases texturales finas (suelos "pesados"), franco arcillo limosa, franco limosa y arcillosa, lo que implica que el manejo del riego debe ser muy cuidadoso, sobre todo en el cultivo de aguacate, especie altamente susceptible a la baja aireación, baja porosidad, exceso de agua y compactación (Beyá-Marshall, *et al.*, 2020b). En este sentido, un grupo importante de agricultores, organizados en distintas instituciones, como AFRUPAL S.A. (Asociación de Productores de Frutas y Paltas), COOPEUMO (Cooperativa Campesina Intercomunal Peumo), usuarios de INDAP y PRODESAL (Programa de Desarrollo Local), tienen un gran interés en mejorar la competitividad de sus cultivos a través de la innovación de procesos. Es así como, para hacer frente a la escasez hídrica, solicitaron apoyo para la implementación de un paquete tecnológico de gestión del riego, el cual ya ha sido validado para la agricultura de exportación en Chile (Callejas *et al.*, 2014a; Callejas *et al.*, 2019), pero que en la pequeña agricultura resulta ser un desafío mayor, dada la importante brecha tecnológica. De esta manera, se desarrolló el proyecto "Plataforma geoespacial para la optimización del recurso hídrico en cultivos de paltos y cítricos de agricultores pequeños y de subsistencia", el cual fue apoyado y financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) del Gobierno Regional de O'Higgins y desarrollado por el Centro Regional de Estudios Agronómicos (UCHILECREA), de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Dado el alto interés concitado, contó con la estrecha colaboración de pequeñas, medianas y grandes empresas ligadas a la producción de aguacate y cítricos de la región.

### 1.2 Objetivo

El objetivo fue desarrollar y transferir un paquete de herramientas tecnológicas para el riego de precisión en el cultivo de paltos y cítricos, con el fin de optimizar el recurso hídrico y mejorar la competitividad de la pequeña agricultura de la región. Los objetivos específicos fueron: 1) Establecer una plataforma de asistencia técnica continua del riego a través de herramientas tecnológicas de precisión (teledetección y sondas de capacitancia) que permitan disminuir la brecha tecnológica y, así, optimizar el

consumo de agua y electricidad; 2) Evaluar y optimizar la huella hídrica a nivel predial a través de teledetección y uso de modelos de transferencias hídricas; 3) Fortalecer las competencias para un correcto uso de la plataforma y difundir sus beneficios entre los actores involucrados.

## 2. METODOLOGÍA

El equipo de trabajo estuvo conformado por un grupo interdisciplinario de académicos y profesionales (suelos, riego, fisiología, modelación y teledetección), más el apoyo de estudiantes de pre y post grado, quienes realizaron sus memorias de título y/o tesis de grado en temáticas relacionadas.

### 2.1 Vinculación con actores involucrados y área de estudio

Se trabajó con 40 pequeños productores de aguacates y cítricos pertenecientes a la AFC de las comunas de Peumo, Pichidegua, Las Cabras y San Vicente de Tagua Tagua, Región de O'Higgins (Figura 1) y la Escuela Agrícola Jean Buchanan de Larráin de Peumo (JB). Estos agricultores pertenecen a diferentes organizaciones gremiales y cooperativas: AFRUPAL S.A, COOPEUMO, usuarios INDAP y PRODESAL. Se trabajó también con los técnicos transferencias, de manera de generar una red entre la Universidad, los técnicos de PRODESAL e INDAP, los productores y los profesores y alumnos del liceo técnico agrícola. Se realizaron reuniones generales de motivación y capacitación en el uso de tecnologías basadas en el internet de las cosas (vinculación de los datos de humedad de suelo a través de telemetría y vinculados a una plataforma con interfaz práctica para la gestión del riego). Esto se fortaleció con siete reuniones, a modo de días de campo masivos y jornadas de capacitación técnicas del tipo talleres, y de a lo menos 20 visitas por año en forma personalizada a cada productor, principalmente entre primavera y verano. Se hace hincapié en mencionar estas actividades, dado que a diferencia de las investigaciones clásicas en pequeñas unidades de estudio (grupo de plantas), la intervención de cuencas, y sobre todo cuando el público objetivo son pequeños agricultores, requiere de un trabajo de socialización y de adopción de la tecnología que se quiere instalar, de manera de asegurar su sustentabilidad en el tiempo. La superficie intervenida equivale a una superficie de 137 hectáreas de 5,029 hectáreas de la región destinada a estos cultivos, de las cuales el 81% cuenta con riego

tecnificado (goteo o microaspersión) y un 19% cuenta con riego tradicional (surco, tendido, tasas, bordes y platabandas) (ODEPA-CIREN, 2018). Si bien estas comunas pertenecen al extenso Valle del Cachapoal, sus condiciones geomorfológicas y cercanía al río Cachapoal, generan un microclima adecuado que les permiten tener una baja frecuencia de heladas, ideal para el cultivo de aguacates y cítricos. De hecho, según Santibáñez *et al.* (2017), la localidad de Peumo se caracteriza por presentar temperaturas que varían, en promedio, entre 29.5°C la máxima (enero) y 4.6°C la mínima (julio), con un promedio de seis heladas por año, una precipitación media anual de 636 mm, un período seco de 7 meses y una evapotranspiración potencial anual de 1,375 mm. El principal cauce de la cuenca del Cachapoal (6,370 km<sup>2</sup>) es el río Cachapoal, que tiene una extensión de 250 km, el cual nace en la zona cordillerana de los Andes y desemboca en el río Rapel (DGA, 2004). Sin embargo, un alto número de productores cuentan con norias y pozos profundos, donde la profundidad del nivel freático varía, en general, de 3 a 10 metros (BiRH, 2020). Los suelos de la zona corresponden en su mayoría a Mollisoles e Inceptisoles (CIREN, 2002), de origen aluvial y aluvio-coluvial, profundos, estratificados y planos a ligeramente inclinados, correspondientes a terrazas antiguas del río Cachapoal, aunque también se utilizan en agricultura suelos que ocupan una posición del piedmont, con aportes coluviales de los suelos graníticos de los cerros que rodean a esta especial microzona. Estos suelos, si bien presentan una alta variabilidad, tanto en profundidad como espacialmente, predominan las texturas medias a finas; es decir, suelos de clase textural franca, franco limosa a franco arcillo limosa (CIREN, 2002; Cuadro 1).

### 2.2. Diagnóstico de las propiedades físicas

Se realizó un diagnóstico de las condiciones físicas de suelo de 15 productores en el área de estudio, con el objeto de establecer limitantes productivas desde el punto de vista físico. Para ello, se tomaron muestras disturbadas y no disturbadas por horizonte de suelo a distintas profundidades del perfil (Figura 2, A y B), evaluando textura, densidad aparente ( $D_a$ ), distribución de tamaño de poros y retención de agua según Sandoval *et al.* (2012), mientras que en terreno se midió la resistencia a la penetración (RP), en condiciones de capacidad de campo, con un medidor de fuerza digital EXTECH (Figura 2, C) según la metodología propuesta por Lowery *et al.* (2002). Las propiedades físicas de suelo fueron cotejadas con los

niveles de vigor de los cuarteles, obtenido con índices de vigor fotosintético de la vegetación mediante imágenes satelitales, con el fin de conocer la variable de suelo que estuviera teniendo la mayor influencia en el vigor de las plantas.

### 2.3. Diagnóstico de los sistemas de riego.

Se realizó el diagnóstico del sistema de riego de 40 productores. Para ello se evaluaron indicadores de

uniformidad de riego y se revisaron el estado de los cabezales de riego, bombas, tuberías de succión y filtros. Se evaluaron en 16 a 20 goteros por sector de riego el caudal entregado por cada emisor siguiendo la metodología propuesta por ISO 9261 (2004), para luego calcular Coeficiente del área sub-irrigada (CU 25%) y el coeficiente de uniformidad (CU) de distribución de Christiansen (Christiansen, 1942), según las ecuaciones Eq 1. y Eq 2, respectivamente.

$$CU\ 25\% = \left( \frac{q\ 25\%}{q\ \bar{u}} \right) \times 100 \quad (1)$$

donde

CU 25% = Coeficiente del área sub-irrigada (%)

q 25% = promedio del 25% de los valores más bajos de caudal obtenidos (L/h)

q  $\bar{u}$  = promedio de todos los caudales de los emisores observados (L/h)

$$CU(\%) = \left( 1 - \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - X}{X \times n} \right| \right) \times 100 \quad (2)$$

donde

CU (%) = Coeficiente de uniformidad (%)

X = Promedio de los caudales evaluados (L/h).

n = número de emisores evaluados (16 a 20)

x<sub>i</sub> = valor de caudal de un emisor (L/h)

### 2.3 Unidades de control del riego de lectura continua y uso de telemetría.

Las tecnologías que se integran en el paquete tecnológico para optimizar el riego y las metodologías de instalación se detallan en Callejas *et al.* (2014 a;b). Se instalaron a través del Valle del Cachapoal (Figura 1), 15 unidades de sondas de capacitancia (*Frequency Domain Reflectometry*; FDR) EnviroSCAN® (Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia) conformadas por 4 sensores ubicados cada 10 a 20 cm, permitiendo evaluar la humedad volumétrica del suelo a profundidades de 60 y 100 cm de profundidad (Figura 3, A). Se utilizaron las calibraciones de fábrica de los equipos para las estimaciones del contenido de agua. Las sondas de lectura continua (cada 15 minutos), se ubicaron en la sobrehilera a 10 cm del emisor de riego, para el caso de goteros, o en la mitad del diámetro de mojamiento de los microaspersores. En el caso de doble líneas de goteros, se ubicó a 10 cm del emisor de una de ellas. Las sondas estaban administradas por telemetría en una plataforma *on line* de gestión del riego (Dropcontrol, Wiseconn). Para esto, se montaron nodos *gateway* (concentrador y transmisor de datos) y nodos transmisores, a una altura de entre 4 a 8 m (Figura 3, B).

Los criterios a considerar para definir el lugar de instalación fueron: la productividad de los cuarteles y el tipo de suelo predominante, seleccionando el

sector que representa la expresión vegetativa del cuartel. Para objetivar este criterio de selección de sitio de instalación, se desarrolló una metodología de diagnóstico de la variabilidad temporal (temporada anterior a la instalación septiembre a mayo) y espacial del vigor de los huertos (Figura 4), a través de índices espectrales de vigor fotosintético de la vegetación, como el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), obtenido mediante imágenes satelitales (10 m x 10 m) del sensor MSI de Sentinel 2, agrupando las zonas a través del estadístico de agrupación espacio-temporal multivariante K-MEANS, ampliamente utilizado para la realización de Análisis de Clúster o Análisis de Conglomerados (Kassambara, 2015) y en la clasificación no supervisada de imágenes satelitales (Borra *et al.*, 2019). La información de la variabilidad del vigor se utilizó para identificar las zonas más homogéneas del cuartel, de manera de establecer la mejor ubicación para la sonda de seguimiento continuo de agua, seleccionando el lugar que permitiera tomar de manera representativa las decisiones de riego. Las Líneas de Gestión o indicadores de referencia para el uso de las sondas de capacitancia, requeridas para determinar el tiempo y la frecuencia de riego, se definieron de acuerdo a Abrisqueta *et al.* (2012), Thompson *et al.* (2007) y Callejas *et al.* (2014b). El primer componente es el nivel de lleno (NLL), máxima cantidad de agua que puede contener el suelo sin que se produzca percolación. Esta condición debe

ser determinada analizando el último sensor del gráfico apilado. En la práctica, esto permite determinar el tiempo de riego óptimo; con un riego se debe asegurar una leve reacción del sensor más profundo. El segundo componente es la capacidad de campo sonda (CCs), obtenida después de un riego profuso (mínimo  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para riego por goteo) o lluvia abundante (superior a 50 mm), siendo dependiente de las características físicas del suelo. En este caso, se definieron aprovechando las lluvias invernales, considerando 1 día después de la lluvia para las texturas gruesas, 2 días para texturas medias y entre 3 a 4 días para texturas finas, esperando que se produjera el drenaje natural y se estabilizara el contenido de agua del suelo. El punto de recarga o Punto de quiebre “*Breaking point*” es el límite que marca el “déficit admisible”, y corresponde al momento en que hay que volver a regar, evitando provocar problemas fisiológicos y disminución del potencial productivo de las plantas (Callejas *et al.*, 2013). Este punto se define cuando se observa un cambio de la pendiente en la curva de extracción de agua desde el suelo por la planta, a una misma evapotranspiración referencial (Abrisqueta *et al.*, 2012; Thompson *et al.*, 2007).

#### 2.4 Unidades de control del riego de lectura discontinua.

A su vez, se instalaron 25 unidades de control de lectura discontinua, conformadas por un tubo de acceso de PVC (Arregui y Quemada, 2006) y el uso del equipo Diviner 2000 (Sentek Sensor Technologies). El tubo de acceso se instaló siguiendo la misma metodología descrita anteriormente para las unidades de seguimiento continuo. Las mediciones se realizaron, principalmente, durante el periodo de primavera y verano, cada 15 a 20 días por productor.

#### 2.5. Evaluaciones en calicata

Para verificar la información obtenida con las sondas, se realizaron evaluaciones del contenido de agua del suelo y su distribución lateral, utilizando calicatas (Figura 2 C) y el equipo TDR100 (Spectrum Technologies, Inc.). Para esto se realizó una grilla de 20 x 20 cm, donde se evaluó en toda la pared (1,2 m de ancho por 0,7 a 1 metro de profundidad) de la calicata el contenido de agua en el perfil, generando imágenes de fácil entendimiento por el productor, para la evaluación del bulbo de mojado.

#### 2.6 Condición hídrica de las plantas.

En forma paralela y con el objeto de validar las Líneas de Gestión, se realizaron evaluaciones del

estado hídrico de las plantas con cuatro repeticiones (árboles), utilizando la cámara de presión tipo Scholander modelo Pump up (PMS Instrument Company MR) (Figura 3, D). El potencial hídrico xilemático se evaluó siguiendo el protocolo de McCutchan y Shackel (1992). Si bien el potencial hídrico xilemático permite hacer un seguimiento del estado hídrico de la planta, muestran una gran variabilidad en función de las condiciones ambientales, por lo que es necesario normalizarlas por variables ambientales que expliquen esas diferencias. En este sentido, el déficit de presión de vapor (DPV) es una de las variables que mejor representa esta condición. Así, por ejemplo, cuando la planta tiene agua fácilmente aprovechable en el suelo, el potencial hídrico de la planta depende principalmente de la demanda atmosférica. La curva de respuesta del potencial xilemático al DPV de cada especie, a un nivel de contenido de humedad o tensión de agua en el suelo no limitante para la planta, se denomina línea base de referencia (Shackel *et al.*, 1997), y se ha implementado como un criterio eficaz para determinar el momento óptimo de riego en diversas especies frutales (Shackel, 2007; Gálvez *et al.* 2014; Corell *et al.* 2016), incluidos cítricos y aguacates (Beyá-Marshall *et al.*, 2020a).

#### 2.7 Estaciones meteorológicas.

Se implementó una red de estaciones meteorológicas (Davis, Vantage Pro2) (Figura 1), obteniéndose los registros de precipitación, viento, humedad relativa, Temperatura y radiación, lo que permitió estimar la evapotranspiración potencial del sector (ET<sub>0</sub>), según la ecuación de FAO-Penman-Monteith (Allen, *et al.* 2006)

#### 2.8. Evaluaciones.

Las principales evaluaciones fueron: a) descripción de los suelos utilizando calicatas y análisis de suelo, b) presencia de raíces en la zona de mojado de los sistemas de riego, para validar la ubicación de las sondas de capacitancia, c) diagnóstico de la operación de los sistemas de riego (eficiencia de mojado, presión de operación y aforo), d) volumen de agua de riego anual en  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , e) costo de la energía a eléctrica ocupada para regar, f) contenido de agua en calicata (TDR 100), g) evolución del contenido del agua en el suelo (sondas continuas y discontinuas), h) potencial hídrico xilemático, y i) producción por hectárea.

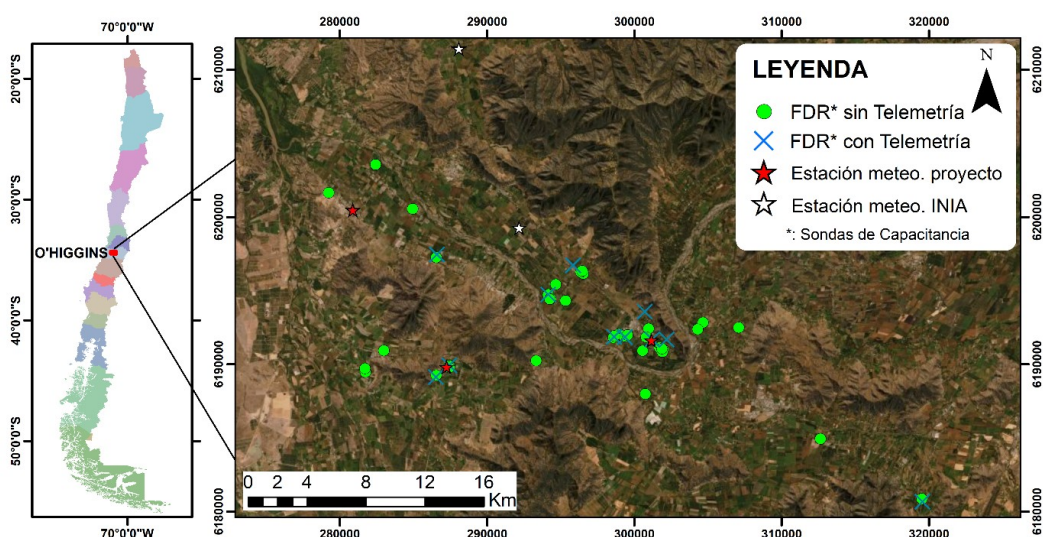


Figura 1. Emplazamiento de unidades de control dentro del Valle del Cachapoal; sondas de capacitancia de medición continua con telemetría (cruz), discontinua o Diviner (punto verde) y estaciones meteorológicas (estrella). INIA: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.



Figura 2. A) Toma de muestras para caracterización física de suelo B) Descripción morfológica de calicata, C) Evaluación de la resistencia a la penetración en el perfil de suelo con medidor de fuerza digital EXTECH, D) Implementación de evaluación sistemática del contenido de agua en el suelo con equipo TDR 100.



Figura 3. A) Pequeño productor con sonda Enviroscan, B) nodo gateway para telemetría, C) Equipo Diviner 2000 para seguimiento discontinuo del contenido de agua en el suelo y D) seguimiento del estado hídrico de la planta a través de la evaluación del potencial xilemático.

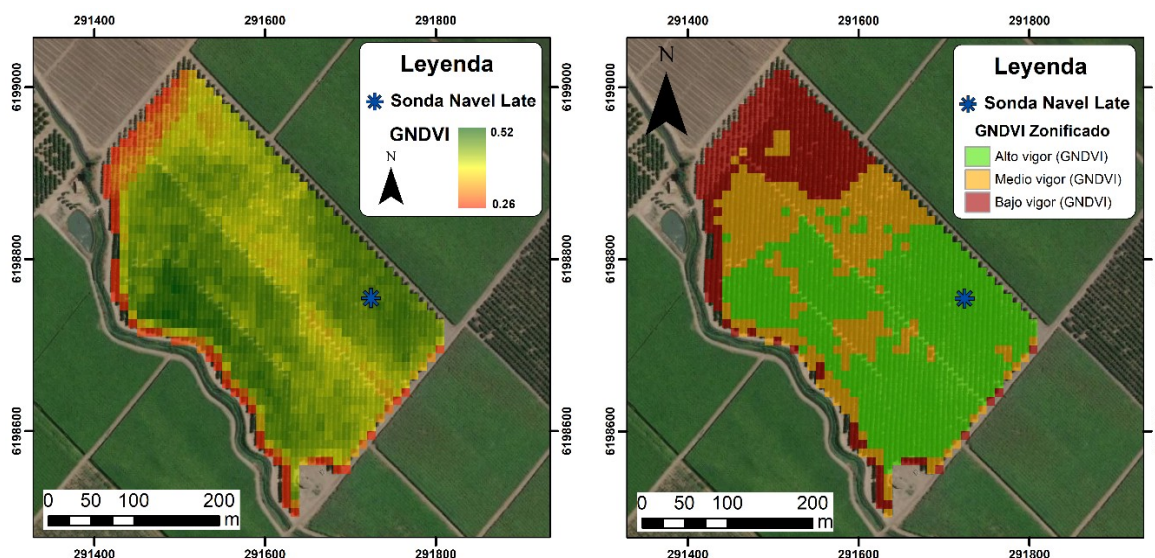


Figura 4. (A) Índice de vegetación GNDVI, a 10 metros de resolución espacial, en pleno desarrollo vegetativo el 18/02/2017. (B) Mapas del análisis de cluster (sectorización automática) utilizando el algoritmo K-MEANS en las imágenes de GNDVI de la temporada anterior al establecimiento de la sonda FDR; se clasificó por alto, medio y bajo vigor.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Diagnóstico de la condición física de suelo

Los suelos correspondieron en su mayoría a mollisoles e inceptisoles, de origen aluvial y aluvio-coluvial, con profundidades que varían entre 75 y 105 cm, aunque en varios casos se construyeron camellones (platabandas de suelo de hasta 1,5m de altura y 2m de base, con relleno del material que se encuentra inmediatamente a los lados de la futura línea de plantación; Figura 3B). Los contenidos de arcilla variaron entre un 11 y un 41%, sin una tendencia dominante en profundidad, aunque con una alta variación entre horizontes (datos nos mostrados).

La principal limitante correspondió al bajo nivel de poros gruesos o macroporos ( $>50 \mu\text{m}$ ), los cuales no superaron el 15% en el 60% de los casos (Cuadro 1) y explicaron un bajo vigor según el índice GNDVI (Figura 5). En este sentido, según Ferreyra *et al.* (2006), el palto presenta un buen desarrollo radical con niveles de poros con aire cercanos al 30% y presenta síntomas de asfixia radicular con niveles de poros gruesos inferiores al 17%. Por su parte, para los cítricos, los valores mínimos de macroporosidad para un adecuado desarrollo de las raíces son 12 a 15% (Patt *et al.*, 1966; Nel y Bennie, 1984; Santana *et al.*, 2006), en tanto valores bajo 12% repercuten fuertemente en la productividad. Esta falta de macroporosidad está atribuida a la compactación por tránsito en condiciones de alta humedad, la errónea

preparación de los camellones y, posiblemente, al bajo nivel de materia orgánica. Esto se reflejó en la elevada resistencia a la penetración (RP) (Figura 6) y la alta densidad aparente ( $D_a$ ) (Cuadro 1). Los niveles de  $D_a$  variaron entre 1,2 y 1,60  $\text{Mg m}^{-3}$ , con la mayoría de los predios (66%) con valores cercanos al valor crítico de 1,4  $\text{Mg m}^{-3}$  en texturas medias a finas (Daddow y Warrington, 1983), indicando serios problemas de compactación; además la RP aumentó en profundidad y superó los 2 MPa por debajo de los 35 cm (Figura 6). Finalmente, la altura de agua aprovechable varió entre 69 y 264 mm para la profundidad de enraizamiento, por lo que el potencial productivo de los frutales se debiese expresar de manera adecuada, si los manejos se orientan a remediar y prevenir la compactación.

Por otra parte, la utilización de camellones en las plantaciones es una práctica generalizada en los predios estudiados, lo que se realiza con el objetivo de aumentar el volumen de suelo explorado. No obstante, el 90% de ellos presentan serios problemas de preparación y, por lo tanto, de estratificación y compactación (Figura 6), observando discontinuidad porosa en el perfil, sintomatología que se asocia a un "efecto macetero". Cabe señalar que esta condición del camellón, asociado a riegos excesivos, es una de las principales causas de los problemas de hipoxia radical en la zona y, por lo tanto, de la baja producción. Esta condición conduce a errores graves en la gestión del riego, debido a que el agua no logra

infiltrar ni distribuirse homogéneamente en el perfil, lo que genera zonas de saturación en superficie (primeros 30 a 40 cm) con escurrimiento del agua hacia entre las hileras, lejos de la zona radical. En estas condiciones, las raíces suelen concentrarse en

las paredes del camellón, donde existe una mejor relación agua/aire, pero, al estar expuesto a la exposición del sol, se seca rápidamente, generando estrés hídrico, entrando en un círculo vicioso de exceso y falta de agua.

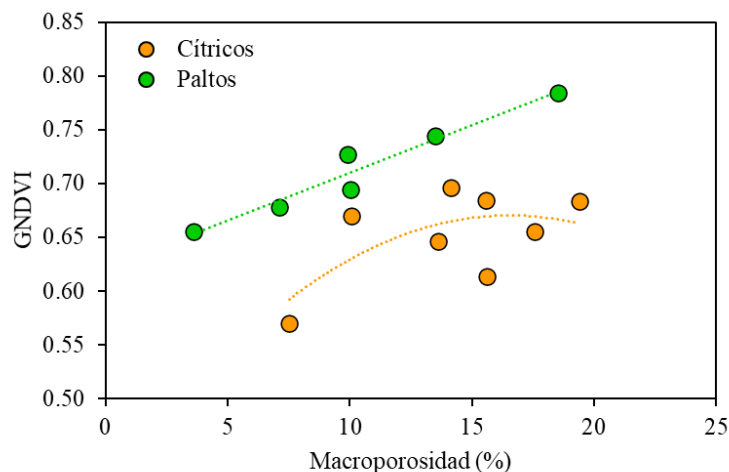


Figura 5. Vigor de huertos de paltos y cítricos, expresado como índice GNDVI (Vegetación de Diferencia Normalizada Verde), en función de la macroporosidad (%) de diferentes suelos de la Región de O'Higgins.

Cuadro 1. Caracterización de las propiedades físicas de los suelos, en los primeros 50 cm de profundidad (valores promedio n=3), cultivados con aguacates y cítricos

Comuna	Sector	Serie de suelo	Cultivo	Clase textural	Da	Macroporosidad	CC	PMP
					(Mg m <sup>-3</sup> )	(%)	(%)	(%)
Peumo	Gulutrén	La Rosa	Limonero	F	1.31	16.8	29.2	20.4
Pichidegua	Santa Amelia	Palquiales	Limonero	Fa	1.66	17.6	24.0	15.2
Peumo	Codao	Peumo	Mandarino	F	1.56	13.6	32.5	19.9
San Vicente TT	Los Rastrojos	Zamorano	Naranja	FAL	1.20	16.9	35.1	28.2
Pichidegua	Santa Amelia	Millahue	Naranja	Fa	1.28	14.9	39.4	13.7
Malloa	El Tambo	T. aluvial	Naranja	F	1.33	19.7	27.1	14.9
Peumo	La Rosa	Pataguas	Naranja	FA	1.35	14.1	31.1	21.5
Peumo	La Rosa	La Rosa	Naranja	FA	1.37	10.2	36.8	23.5
Pichidegua	Patagua Cerro	Larmahue	Naranja	FA	1.47	5.6	52.6	26.2
Peumo	Aguas Claras	Peumo	Aguacate	FL	1.28	13.5	37.5	14.7
Peumo	La Granja	Peumo	Aguacate	F	1.34	19.4	27.6	15.9
Peumo	Gulutrén	Pimpinela	Aguacate	F	1.35	3.6	45.6	21.0
Peumo	Aguas Claras	La Rosa	Aguacate	FA	1.42	10.0	38.9	25.4
Peumo	La Cantera	Peumo	Aguacate	F	1.46	18.5	29.6	15.5
Peumo	Codao	La Rosa	Aguacate	F	1.52	8.6	37.7	23.3

Da: Densidad aparente; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente.

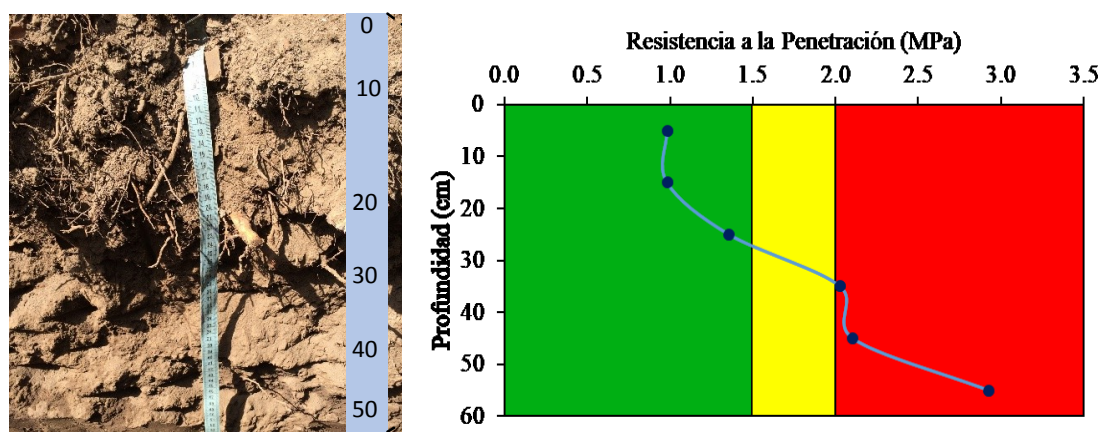


Figura 6. Distribución del crecimiento de raíces de palto en profundidad y resistencia a la penetración en el camellón de suelo. Se observa que la mayor parte de las raíces se encuentra en los primeros 30 cm (zona verde), donde los valores de resistencia a la penetración son menores a 1.5 MPa. En profundidad la compactación aumenta, inhibiendo la exploración de las raíces del palto. Colores verde, amarillo y rojo indican rangos de resistencia a la penetración adecuados, restrictivos y limitantes para el crecimiento de raíces, respectivamente.

En este contexto, es estrictamente necesario realizar manejos que promuevan la incorporación de materia orgánica al suelo, ya sea a través de los rastrojos de cosecha, la adición de estiércol animal maduro o compostado o el uso de enmiendas líquidas comerciales aplicadas con el sistema de riego (Seguel *et al.*, 2003; Seguel *et al.*, 2015).

### 3.2 Diagnóstico de los sistemas de riego tecnificado.

De los 40 sistemas de riego evaluados, sólo el 51% contó con un equipo de riego en estado “Excelente”, es decir, que el caudal de riego diseñado es similar al entregado (>94% de uniformidad); un 22% estuvo en categoría “Bueno” (86 a 94% de uniformidad de riego); un 16% en el rango “Aceptable” (80 a 86% de uniformidad del riego), y un 11% presentó serios problemas de uniformidad (<80%) (Figura 7). Los casos más críticos de baja uniformidad se observaron en productores que tienen un sistema de riego muy antiguo (más de 15 años), en el que se presentan problemas asociados al cambio o adición de goteros de diferente caudal, taponamiento y desgaste de goteros y/o goteros de caudal regulable. Por otro lado, se constató que un 22% de los agricultores entregaba más agua de lo que debía; un 32% se encontraba con un riego subóptimo (80 a 95% de eficiencia); un 14% estaba en condiciones inaceptables (<80% de eficiencia) y sólo un 32% presentaba condiciones excelentes. Por su parte, sólo el 25% de los sistemas de riego diagnosticados cuentan con la presión adecuada para asegurar un flujo turbulento, mientras que el resto tiene presiones subóptimas, lo que no sólo aumenta la probabilidad

de obturación de los emisores, debido a la acumulación de partículas finas por decantación, sino que conduce a un menor aporte de agua al sistema. Las principales causas de esta falta de presión son: el uso de una bomba de riego con baja potencia por desgaste de rodetes, mala mantención de los filtros y/o la incorporación de nuevas líneas de riego. En general, la baja uniformidad y presión de operación provocan un ineficiente manejo del recurso hídrico. En este sentido, antes de realizar cualquier instalación de tecnologías para el seguimiento de la humedad del suelo, es necesario contar con sistema de riego que esté operando en óptimas condiciones, de manera de asegurar que el proceso de toma de decisiones con las sondas sea representativo del cuartel, evitando fracasos en la implementación de las tecnologías. Por otro lado, sólo un 10% de los sistemas de riego diagnosticados contó con caudalímetros y con contador volumétrico a la salida de la bomba para cuantificar el volumen de agua utilizado en cada riego. Este tipo de instrumentos son fundamentales para obtener indicadores de eficiencia sobre la estrategia de fertilización y sobre el consumo de agua en la temporada de riego; al respecto, se recomendó a todos los beneficiarios realizar las inversiones correspondientes para adquirir estos equipos. Para estimar el volumen de agua utilizado se instalaron contadores volumétricos en las líneas de riego; conociendo la cantidad de emisores por superficie y la uniformidad de los caudales (%CUC) fue posible cuantificar el volumen de agua utilizado en cada temporada.





Figura 7. Diagnóstico de la operación de los sistemas de riego tecnificado

### 3.3 Control del contenido de agua del suelo

Para cada unidad de monitorización con sonda, se pudo definir el nivel de lleno (NLL) (Figura 8), CCs y el punto de recarga (Figura 9), una vez estabilizada la variabilidad de las evaluaciones del equipo por efecto de la instalación. Con esta información y el uso del gráfico “sumado”, el cual suma los valores de contenido de agua de los tres primeros sensores, fue factible determinar la frecuencia de riego (Figura 9). Posteriormente y analizando el comportamiento individual de cada sensor gráfico “apilado”, se pudo obtener el tiempo de riego de cada productor, evitando la pérdida excesiva de agua de riego por percolación profunda (Figura 8). En resumen, las sondas de todos los sitios quedaron funcionando y en línea, mostrando buena actividad del sistema radical en relación a la ETO diaria del lugar, tal como se muestra en la Figura 9.

Por otro lado, en huertos con problemas de macroporosidad se pudo observar que incluso a niveles de contenido de agua por debajo de capacidad de campo el consumo de agua se ve reducido por la falta de aireación (hipoxia), y el consumo se maximiza a niveles de agua menores (mayor oxígeno disponible), al observarse una mayor tasa de consumo aparente de agua (Figura 10). En estos casos se recomendó la aplicación de materia orgánica y/o enmiendas líquidas (ácido húmico), con el

objetivo de mejorar la estructuración del suelo y disminuir la frecuencia de riego para evitar periodos de hipoxia.

Por otro lado, para la estimación de los tiempos de riego con mediciones de humedad de sondas discontinuas, se realizaron evaluaciones antes y después del riego, corroborando una óptima condición hídrica del bulbo húmedo y evitando la percolación profunda. Los criterios de riego para cada caso fueron corroborados a través de las evaluaciones del estatus hídrico de la planta y en calicata usando el equipo TDR100, generando una prospección del bulbo húmedo, en particular el desplazamiento lateral del agua de riego (Figura 11). En este sentido, si bien los equipos de lectura continua son una potente herramienta de trabajo, la experiencia deja de manifiesto que las evaluaciones en calicata con equipos TDR portátiles son fundamentales para validar los resultados de los estudios, desde el comportamiento del agua en el perfil hasta la interacción con el sistema de riego, la condición del suelo y las plantas y la demanda atmosférica (Callejas et al., 2014b; Callejas et al., 2019). También permiten detectar problemas de uniformidad del bulbo de mojamiento, como excesos de humedad (Figura 11 A) y cambios en la continuidad hidráulica del suelo (Figura 11B), entre otros.

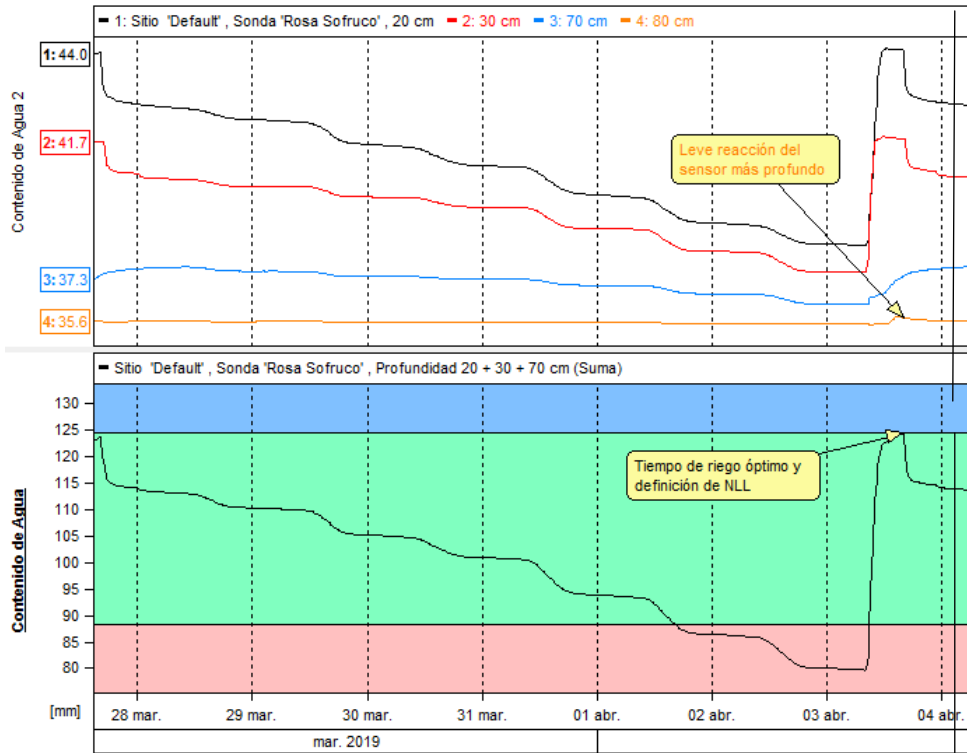


Figura 8. Visualización en software Irrimax® de los gráficos apilado (arriba) y sumatoria (abajo), con los que se determina el Nivel de Lleno (NLL) y el tiempo de riego óptimo. En el gráfico apilado se observa una leve reacción del sensor más profundo con el riego.

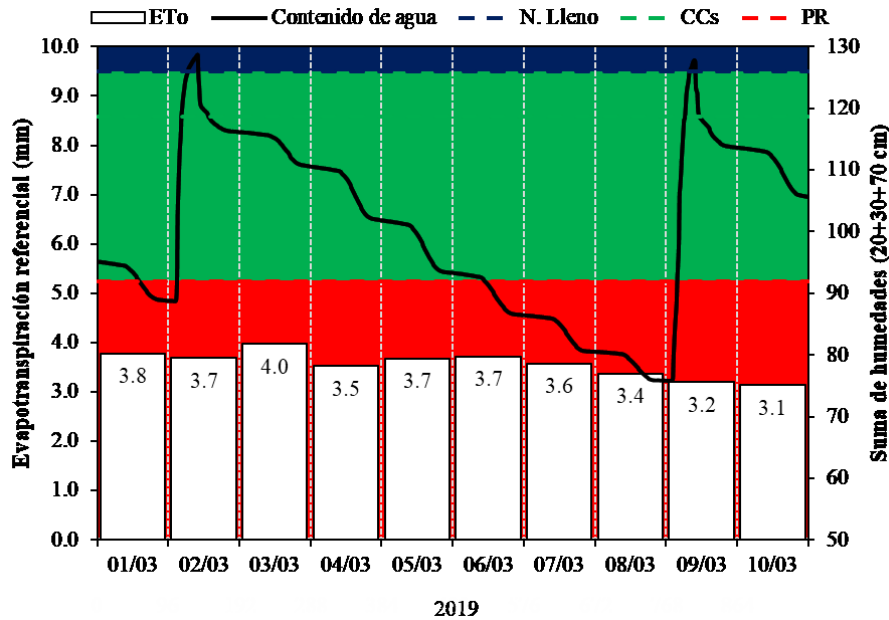


Figura 9. Determinación del punto de recarga (PR; línea roja) en verano, con similar evapotranspiración (barras blancas) durante un ciclo de riego, en un huerto de naranjo. Dinámica del contenido de agua (línea negra) en la zona de mayor proporción de raíces, expresado como la suma de las lecturas de la sonda Enviroscan a 3 profundidades. Se observa que las caídas diarias de humedad o déficit diario ( $\Delta$ ) van siendo más pequeñas a medida que se seca el suelo, indicando una limitación en la capacidad de extracción de agua por la planta. Capacidad de campo sonda (CCs; línea verde); N. Lleno (Nivel de lleno; línea azul).

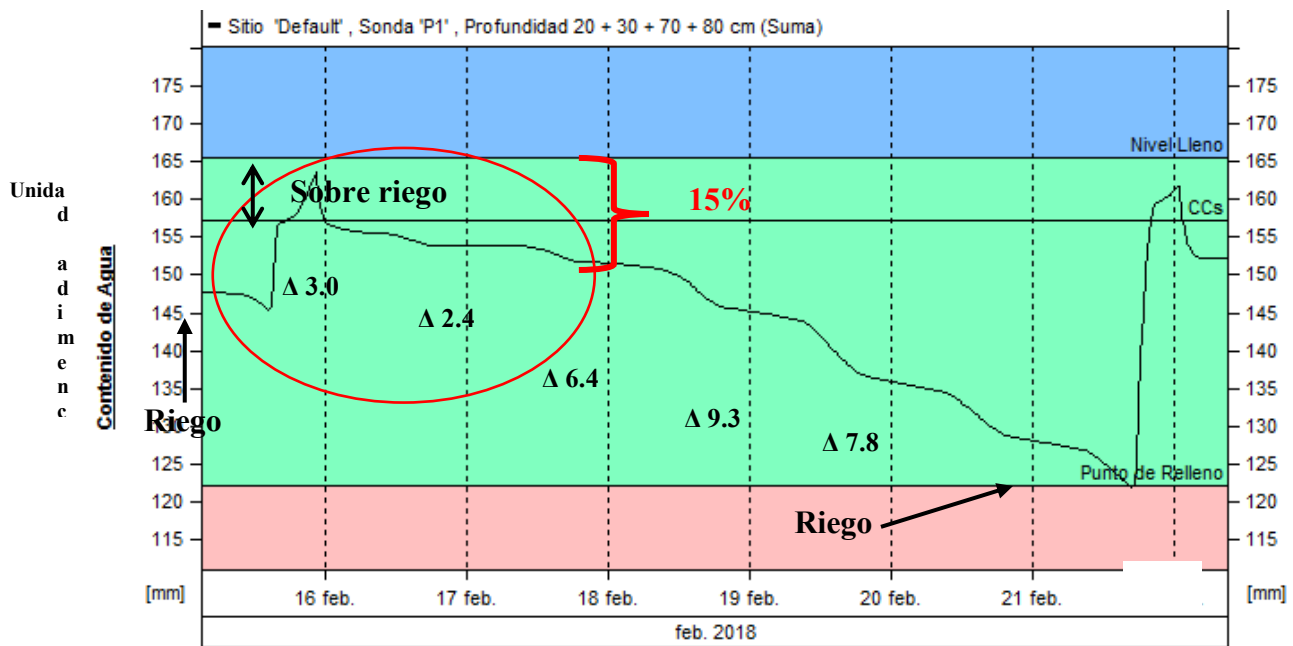


Figura 10. Reducción del consumo de agua por efecto de la falta de aireación o hipoxia (círculo rojo: dos días con menos de un 15% de poros con aire), generado por sobreriego en suelo con baja macroporosidad cultivado con Naranja Lane Late/Citrumelo. Todos los días fueron soleados con una evapotranspiración de referencia promedio de 5 mm/día. Color azul, verde y rosado, indican niveles de humedad en el suelo saturado, adecuado y con estrés hídrico, respectivamente.

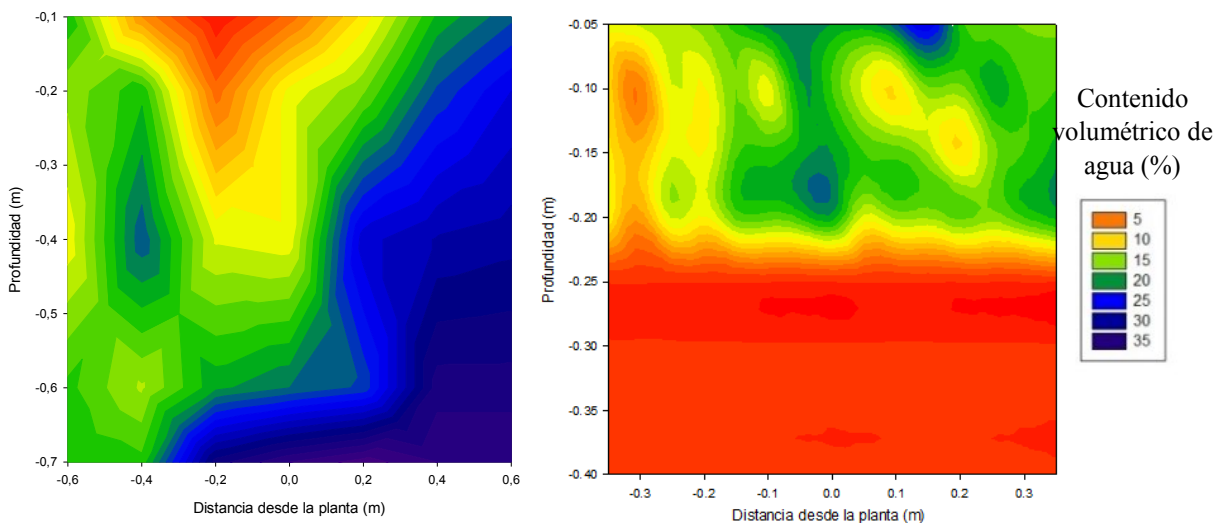


Figura 11. Contenido volumétrico de agua del suelo evaluado con equipo TDR100 en sentido perpendicular a la hilera de plantación (ubicada en el punto 0,0 m de la escala en el eje horizontal). A. Calicata en un suelo franco, posterior a un riego, en un huerto de aguacate. Flechas negras indican la posición del emisor de riego (doble línea de goteros 4 L/h). Se observa que el emisor izquierdo entrega una menor cantidad de agua comparado con el emisor derecho. B. Calicata en suelo franco, inmediatamente antes de un riego, en un huerto de aguacate. Flecha negra indica la posición del emisor de riego (micro-aspersor 32 L/h). Se observa pérdida de la continuidad hidráulica del suelo, con sectores compactados donde el movimiento del agua se ve dificultado.

### 3.4 Seguimiento del estado hídrico de planta

El propósito de esta medición fue validar el establecimiento de las líneas de gestión del riego a nivel de la planta, ajustar la frecuencia de riego y definir el momento oportuno del riego, asegurando que no exista estrés hídrico relacionado con el manejo de las sondas. Para ello, anteriormente se desarrollaron líneas base de referencia (potencial hídrico xilemático en función del DPV en cultivos en condiciones sin limitación hídrica) para cada uno de los frutales trabajados en este proyecto (Beyá-Marshall et al., 2020a). En la Figura 12 se muestran las evaluaciones de potencial xilemático realizadas justo antes del riego a diferentes beneficiarios. En general, la frecuencia de riego de la mayoría de los agricultores no era la adecuada, sometiendo la planta a condiciones de estrés hídrico durante la temporada (valores bajo la línea base de referencia). Por otro lado, valores muy por sobre la línea base indican una alta frecuencia de riego, lo que podría indicar riegos innecesarios y, en algunos casos, mayor susceptibilidad a enfermedades como Phytophthora

(Ferreya et al., 2006). De esta manera, la línea de base puede usarse para evaluar si el programa de riego está abordando efectivamente las necesidades de agua de los cultivos. ¿El riego aumentó el potencial hídrico hasta o cerca de la línea de base un día después del riego? Si no es así, es posible que se esté subirrigando. ¿Se mantiene el cultivo cerca de la línea de base antes del próximo riego? Puede retrasar el riego unos días (si es posible) o reducir la cantidad de agua aplicada en el próximo riego. ¿Están los valores de potencial hídrico xilemático por encima de la línea de base? Es probable que el suelo esté demasiado húmedo. En este sentido, Beyá-Marshall et al. (2020a) demostraron que plantas sobre regadas (30% más que el tratamiento de referencia, regado con las líneas de gestión) presentaron un estatus hídrico por sobre esta curva durante toda la temporada, pero sin mejorar la productividad, disminuyendo la eficiencia en el uso del agua. Por lo tanto, mantener los cultivos cerca de los valores esperados (líneas de referencia) permitiría un ahorro de agua sin afectar la productividad.

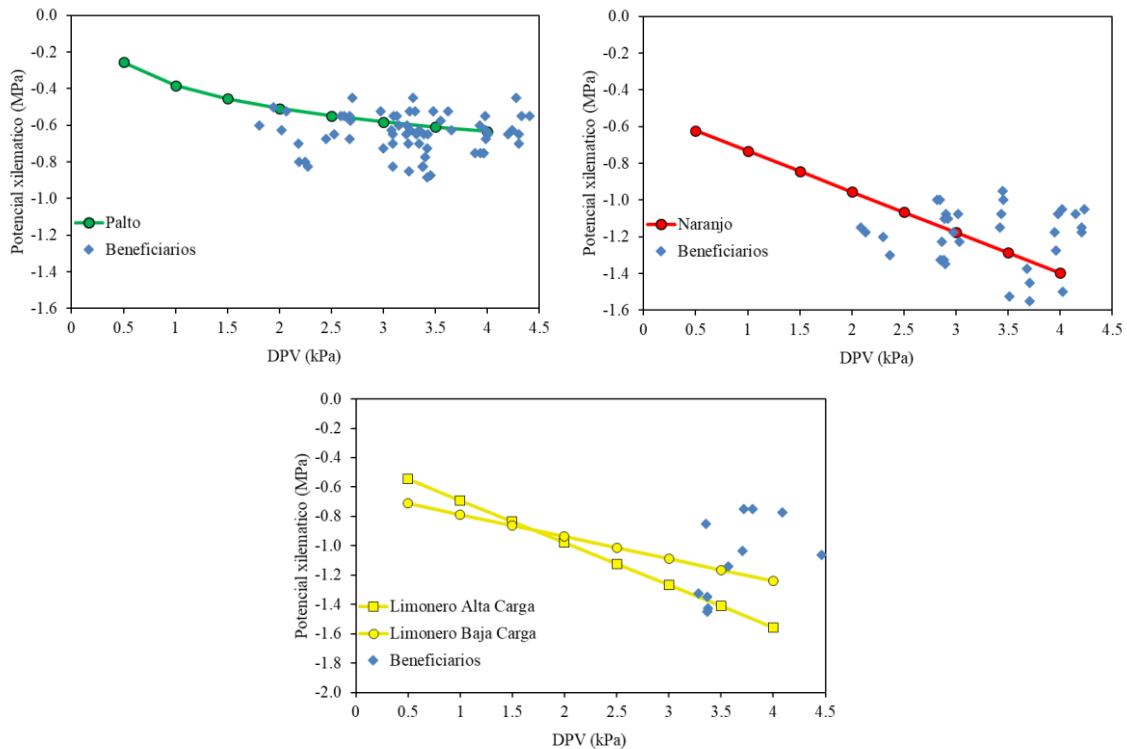


Figura 12. Evaluaciones de potencial xilemático y déficit de presión de vapor (DPV) a los beneficiarios con cultivo de aguacate, naranja y limonero. La línea continua denota el valor de potencial hídrico xilemático esperado para una planta sin limitaciones hídricas a diferentes condiciones de déficit de presión de vapor (DPV), en tanto los rombos azules corresponden a los diversos agricultores (Beyá-Marshall et al., 2020a).

### 3.5 Ahorro hídrico y eficiencia en el uso del agua

La cantidad de agua utilizada fue estimada mediante el uso de calendarios de riego, cálculos de descarga de los equipos, caudalímetros de línea, lecturas de la sonda e información proporcionada por el productor. En general, con el paquete tecnológico propuesto, se logró un 28% (2,640 m<sup>3</sup>/ha) y un 40% (3,803 m<sup>3</sup>/ha) de ahorro promedio en el uso de agua de riego respecto a la situación ante proyecto, respectivamente para la primera y la segunda temporada de proyecto. En la primera temporada se logró que 85% de los 40 productores disminuyeran su consumo de agua, mientras que en la segunda el 96% de ellos redujo su consumo. Esto permitió un aumento de la eficiencia

del uso del agua agronómica de entre un 23a 30%, una reducción del consumo eléctrico de entre un 17 a un 23% y un aumento monetario del uso de agua de entre un 22 a 35% con respecto a la situación ante proyecto (Figura 13). Resultados similares de eficiencia del uso de agua han sido previamente obtenidos por Callejas et al., (2014a) y Callejas et al. (2019) en agrícolas de mayor escala destinadas a exportación de fruta fresca. Esto demuestra que una transferencia tecnológica asociada al mejor uso del agua a través de tecnología y una investigación participativa es un mecanismo eficaz para optimizar el recurso hídrico de la AFC.

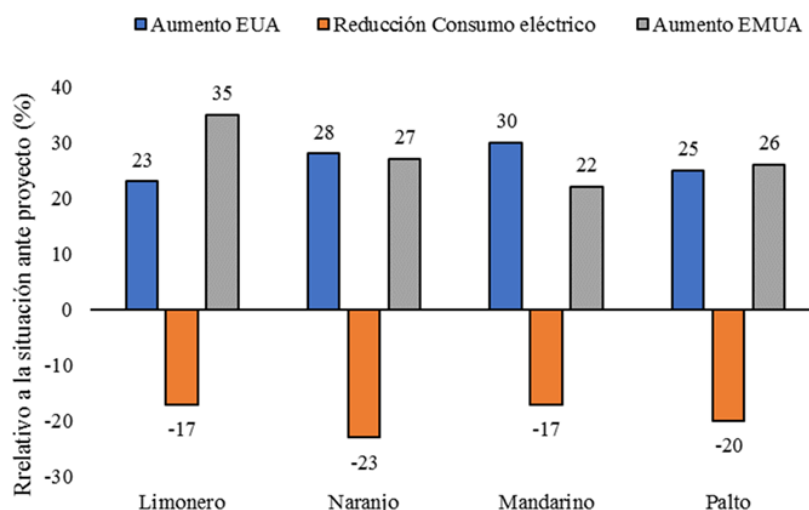


Figura 13. Indicadores de eficiencia del uso de agua agronómica (EUA; kg/m<sup>3</sup> de agua aplicada), eléctrica (US\$/año) y monetaria (EMUA; ingresos (US\$) por la venta de la producción por cada metro cúbico de agua de riego aplicado) relativa a la situación ante proyecto.

La mayor eficiencia puede ser explicada por:

a) Determinación de primer riego acorde a las reservas del suelo y la variabilidad climática primaveral. Usualmente los productores comenzaban a regar en el mes de septiembre con una frecuencia de riego fija y frecuente, con el suelo aún húmedo, sin considerar la variabilidad de la demanda atmosférica (ET<sub>0</sub>) característica de la primavera (1.2 mm a 4 mm). Esto tiende a generar condiciones de hipoxia y/o anoxia radical, que se manifiestan por un desacople entre el consumo de agua de raíces y la ET<sub>0</sub>, lo que se observa como una disminución leve en el contenido de agua en el suelo en este periodo (Figura 14). Con la información entregada por las

sondas de humedad, se puede observar cómo el contenido de agua en el suelo varía según la demanda, entregando el agua de manera oportuna, ajustando la frecuencia según los consumos diarios, sin generar estrés en las plantas por exceso de agua en el suelo.

b) Disminución en el tiempo de riego con el consecuente aumento en la frecuencia de riego para mejor distribución de la humedad en la zona de raíces (primeros 50 cm en palto y 80 en cítricos), evitando percolación.

c) Ajuste de la frecuencia y tiempo de riego durante la temporada, que guarda relación con los cambios en la necesidad hídrica de la planta, según potencial

xilemático, en un momento determinado y las características del suelo (Figura 12).

d) No menos importante, correcta mantención de los sistemas de riego, lo que implicó protocolos de retrolavado de filtros y mantención de las laterales de riego, con descoles en función de la calidad del agua de riego y/o reemplazo de líneas antiguas con goteros de baja uniformidad.

En síntesis, y tal como ha sido previamente demostrado en otros estudios con pequeños productores en América Latina (Córdoba et al., 2004; Pérez y Clavijo, 2012), la investigación e innovación participativa, al incorporar activamente a los agricultores en la definición, priorización y solución de sus problemas, aportando al mismo tiempo sus

conocimientos sobre los complejos sistemas productivos y otros (políticos, sociales) en los cuales se desenvuelven, hace más pertinente y asegura que los resultados de este trabajo en conjunto entre productores, universidades e instituciones sean más apropiados para una parte importante de los productores; todas ventajas que en los sistemas tradicionales de investigación y extensión pocas veces se cumplen (Córdoba et al., 2004). El presente trabajo podría servir de base para ser replicado y/o adaptado en otras zonas y/o regiones de América Latina, donde sea altamente relevante incorporar tecnologías de riego en la agricultura familiar campesina para hacer frente a la menor disponibilidad de agua.

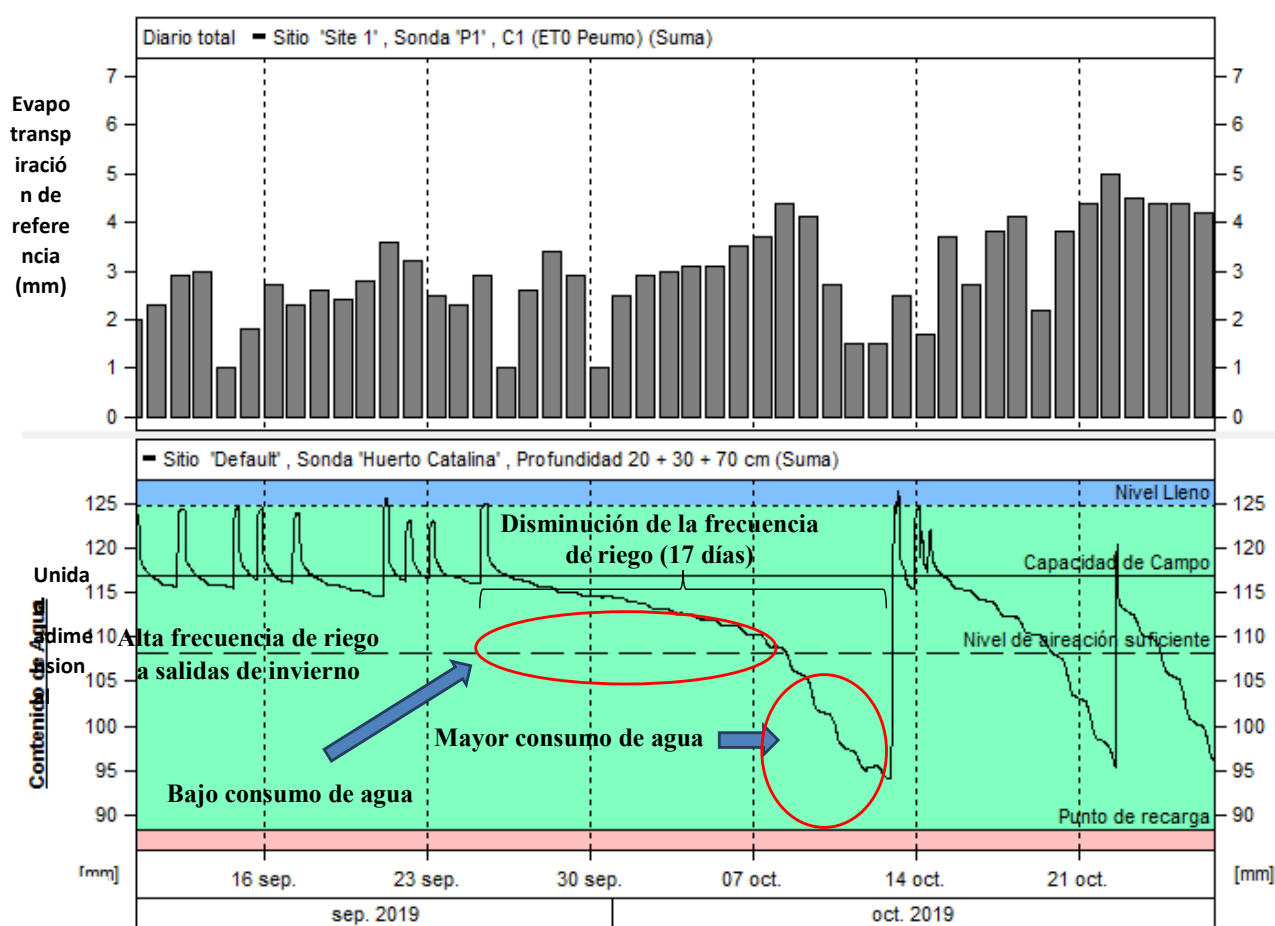


Figura 14. Reducción de la frecuencia de riego a inicios de primavera, en un suelo franco arcilloso con problemas de macroporosidad, de acuerdo a la necesidad hídrica de la planta y evitando situaciones de hipoxia. Se observa cómo, cuando se dejó de regar, el consumo de agua cada vez fue mayor a medida que el suelo empezaba a tener menor relación agua/aire, hasta alcanzar un nivel de aireación suficiente, donde el consumo de agua aparente es máximo, incluso con menor demanda atmosférica (ET0).

#### 4. CONCLUSIONES

Se concluye que la brecha tecnológica de los pequeños productores puede ser considerablemente reducida si se utiliza un paquete tecnológico adecuado. Este no solo debe incluir tecnología, sino que también un acompañamiento permanente y con estudios prácticos de validación de tecnologías, desarrollados en conjunto con los agricultores. Además, un adecuado diagnóstico de la condición del sistema productivo y de su variabilidad espacial y temporal son necesarias para garantizar un correcto establecimiento de las tecnologías de seguimiento del estado hídrico del suelo y del cultivo. Con todo lo anterior, se logró mejorar la estrategia de riego, aumentando la precisión en las estimaciones de los tiempos y frecuencias con información objetiva. Esta información debe ser de simple visualización y útil, de manera de que el agricultor pueda apropiarse de la tecnología y pueda prolongar su uso en el tiempo. El

establecimiento del paquete tecnológico se valida mediante la importante mejora registrada en los indicadores de eficiencia de uso del agua, de uso de energía y eficiencia monetaria, logrando el objetivo de mejorar la competitividad de la agricultura familiar campesina. Este paquete podría ser replicado y/o adaptado a otras realidades de productores de Chile y/o América Latina

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Gobierno y Consejo Regional de O'Higgins, por haber financiado este proyecto (IDI 30474710) a través del Fondo de Innovación para la Competitividad. A los productores que apoyaron en todo momento la correcta ejecución de las actividades comprometidas, al equipo técnico de PRODESAL Peumo y a los profesores de la Escuela Agrícola Jean Buchanan de Larrain de Peumo.

#### REFERENCIAS

- Abrisqueta, I., Vera, J., Tapia, L., Abrisqueta, J., & Ruiz-Sánchez, M. (2012). Soil water content criteria for peach trees water stress detection during the postharvest period. *Agric. Water Manag.*, 104: 62–67.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. FAO, Roma, Italia. ISBN:-92-5-304219-2
- Arregui, L., & Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. *Plant Soil*, 288: 57-69.
- Beyá-Marshall, V., Kremer, C., & Baeza, B. (2020a). Relaciones hídricas en paltos y cítricos, 122-136. En: Beyá-Marshall, V., Galleguillos, M (Eds). Optimización del riego en paltos y cítricos. Serie Ciencias Agronómicas N° 34, Universidad de Chile. Chile. ISBN: 978-956-19-1182-6.
- Beyá-Marshall, V., Seguel, O. & Baeza, B. (2020b). Diagnóstico de las condiciones físicas de suelo y su relación con el potencial productivo de paltos y cítricos en la región de O'Higgins. En: Beyá-Marshall, V., Galleguillos, M (Eds). Optimización del riego en paltos y cítricos. Serie Ciencias Agronómicas N° 34, Universidad de Chile. Chile. ISBN: 978-956-19-1182-6.
- BiRH-VI, (2020). Banco de Información de Recursos Hídricos de la Región de O'Higgins. [Consultado el 16 de julio 2020]. Disponible en: <http://www.birh.cl/>
- Borra, S., Thanki R., & Dey N. (2019). Satellite image analysis: clustering and classification. Springer Briefs in Computational Intelligence. ISBN: 978-981-13-6424-2.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150(3-4), 131–147. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7>
- Callejas, R., Vera, J., Río seco, M., Prohens, F., Osorio, H. Pino, P. Navarrete, J., & Gálvez, R. (2014a). Generación e integración de tecnologías destinada al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. *Aqua-LAC*, 6 (2), 71 – 83.
- Callejas R., Vera, J., & Kremer, C. (2014b). Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Serie Ciencias Agronómicas N° 23. Universidad de Chile, Chile. ISBN: 978-956-19-0893-2
- Callejas R., Saavedra, R., Seguel, O., Bustamante, C., & Camilla, D. (2019). El internet de las cosas como herramienta para enfrentar la sequía provocada por el cambio climático en la producción de uva para pisco. *Aqua-LAC*, 11, 1–16.
- Callejas, R., Navarrete, J., & Río seco, M. (2013). Líneas de gestión para el riego: umbrales para interpretar los datos de humedad del suelo registrados por sondas de capacitancia. *Revista Antumapu Profesional*. Volumen

2. Número 3. Dirección de desarrollo y transferencia tecnológica. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.
- Córdoba, M., Gottret, M., Asociados, T., Montes, A., Ortega, L. & Perry, S. (2004). Innovación participativa: experiencias con pequeños productores agrícolas en seis países de América Latina. Red de desarrollo agropecuario. Unidad de Desarrollo Agrícola. División de Desarrollo Productivo y Empresarial. Santiago, Chile. ISBN: 92-1-322600-4
- Christiansen, J. (1942). Irrigation by sprinkling. California Agriculture Experiment Station Bulletin, No. 670.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2002). Descripciones de suelo, Materiales y Símbolos - Estudio Agrológico de la VI Región. Pub. CIREN N°114. 595 p.
- Corell, M., Pérez-López, D., Martín-Palomo, M., Centeno, A., Girón, I., Galindo, A., Moreno, M.M., Moreno, C., Memmi, H., Torrecillas, A., Moreno, F., & Moriana, A. (2016). Comparison of the water potential baseline in different locations: usefulness for irrigation scheduling of olive orchards. *Agric. Water Manage.* 177, 308–316
- Daddow, R., & Warrington. G. (1983). Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Watershed Systems Development Group, USDA Forest Service. 17p.
- DGA (Dirección General de Aguas). (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Rapel. Informe MOP (Ministerio de Obras Públicas). Gobierno de Chile.
- Ferreira, R., Sellés. G., Maldonado, P., Celedón, J. Barrera C., & Gil, P. (2006). La asfixia radicular y el manejo del riego en paltos. Seminario Internacional manejo del riego y suelo en el cultivo del palto - Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). La Cruz, Chile
- Galvéz R., Callejas, R., Reginato, G., & Peppi, M. (2014). Irrigation schedule on table grapes by stem water potential and vapor pressure deficit allows to optimize water use. *Ciência Téc. Vitiv.* 29(2), 60-70.
- Garreaud, R., Álvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., Le Quesne, C., McPhee J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 98, 1–37.
- Garreaud, R., Boisier, J. Rondanelli, R. Montecinos, A., Sepúlveda H., & Veloso-Águila D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421–439.
- ISO 9261. (2004) Agricultural Irrigation Equipment—Emitters and Emitting Pipe—Specification and Test Methods. Austrian Standards Institute, Wien.
- Kassambara, A. (2015). *Multivariate Analysis 1: Practical Guide to Cluster Analysis in R (real version)*. Taylor & Francis Group. ISBN: 9781542462709
- Lowery, B., Morrison, J.E. & Hopmans, J.W. (2002). Soil penetrometers and penetrability. Pp.363-388. In: Dane, J.H., Topp G.C (Ed). *Method of soil analysis*. SSSA book series. Madison, Wisconsin, USA. ISBN: 978-0-891-18893-3.
- McCutchan, H., & Shackel, K. (1992). Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117, 607–611.
- Nel, D., & Bennie, A. (1984). Soil factors affecting tree growth and root development in a citrus orchard. *South African Journal of Plant and Soil*, (2), 39-47.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). (2017). Principales resultados del programa AFC de ProChile noviembre de 2017. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. 11p.
- ODEPA-CIREN (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias- Centro de Información de Recursos Naturales). (2018). Catastros frutícolas, principales resultados, Región de O'Higgins/ Julio 2018. [Revisado el 2 de mayo de 2019]. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/CatastroOhiggins2018.pdf>
- Patt, L., Carmeli, D., & Zafrir, I. (1966). Influence of soil physical conditions on root development and on productivity of citrus trees. *Soil Science*, 102, 82 – 84.



- Pérez, M., & Clavijo, N. (2012). Experiencias y enfoques de procesos participativos de innovación en agricultura. Estudios sobre innovación en la agricultura familiar. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Roma, Italia. ISBN: 978-92-5-307425-9
- Sandoval, M., Dörner, J. Seguel, O. Cuevas, J., & Rivera, D. (2012). Métodos de análisis físicos de suelos. Publicación N°5, Chillán: Universidad de Concepción.
- Santana, M. Souza, L. Da S., Souza, L., & Fontes, L. (2006). Soil physical attributes and citrus root system distribution as indicators of cohesive layers in soils of coastal table lands in the state of Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, 1–12.
- Santibáñez, F., Santibáñez, P. Caroca, C., & González, P. (2017). Atlas agroclimático de Chile: Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule. Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. ISBN: 9789561910447
- Seguel, O. G. Arancibia, & R. Callejas. (2015). El manejo físico del suelo para la adecuada producción de frutillas. En: Callejas, R y Díaz, M. (eds). Cultivo de la frutilla con identidad regional: Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Provincia de Cardenal Caro. Serie Ciencias Agronómicas N° 26. ISBN: 978-956-19-0945-8
- Seguel, O. V. García De Cortázar, & M. Casanova. (2003). Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*, 63(3), 287-297.
- Shackel, K. (2007). Water relations of woody perennial plant species. *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin*, 41, 121–129.
- Shackel, K. Ahmadi, H. Biasi, W. Buchner, R. Goldhamer, D. Gurusinge, S. et al. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *Horttechnology*, 7, 23–29.
- Thompson, R., Gallardo, M. Valdez, L., & Fernández, M. (2007). Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agric. Water Manag.* 88, 147–158.

*Como citar este artículo:*

Beyá-Marshall, V. et al., (2021). Paquete tecnológico para la optimización del recurso hídrico en pequeños productores de aguacates y cítricos en Chile Central. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 16-33. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-02



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

## Global water governance and water rights through the prism of Canaan, a slum apart in Haiti

*La gobernanza mundial del agua y los derechos sobre el agua a través del prisma de Canaán, un barrio marginal de Haití*



Yolette Jérôme<sup>1,2,3</sup>, Evens Emmanuel<sup>4\*</sup>, Pascal Saffache<sup>2</sup>

Recibido: 13/04/2021

Aceptado: 27/04/2021

\*Autor de correspondencia

### Abstract

*In Haitian cities, the disorganization of urban planning most often leads to the creation of new human settlements, which lack basic services, such as the provision of drinking water and sanitation. The proliferation of slums has an unfavorable effect on the hydrological cycle by reducing the permeabilized surfaces, causing significant disturbances in the recharge of groundwater. Furthermore, the impact of global changes on cities today is causing water scarcity, which makes it difficult to manage water resources effectively. Taken in the prism of environmental conditions and the way in which the metropolitan area of Port-au-Prince is to be developed, this situation not only deprives the populations of the slums of this vital element, but also violates one of their fundamental rights "the right to water and sanitation". Canaan, a human establishment created following the earthquake of January 12, 2010 by presidential decree, and inhabited by the victims of this event, constitutes in itself a real field laboratory allowing the veracity of such an assertion to be tested. The objective of this work is to analyze in the light of the major trends in global water governance, the right to water, one of the fundamental human rights, in Canaan.*

**Keywords:** right to water, water management, governance, citizen participation, hydro-social cycle, Canaan.

### Resumen

En las ciudades haitianas, la desorganización de la planificación urbana conduce con mayor frecuencia a la creación de nuevos asentamientos humanos, que carecen de servicios básicos, como el suministro de agua potable y saneamiento. La proliferación de barrios marginales tiene un efecto desfavorable sobre el ciclo hidrológico al reducir las superficies permeabilizadas, provocando importantes perturbaciones en la recarga de las aguas subterráneas. Además, el impacto de los cambios globales en las ciudades de hoy está provocando escasez de agua, lo que dificulta la gestión eficaz de los recursos hídricos. Tomada en el prisma de las condiciones ambientales y de la forma en que se va a desarrollar el área metropolitana de Puerto Príncipe, esta situación no solo priva a las poblaciones de los barrios marginales de este elemento vital, sino que además viola uno de sus aspectos fundamentales. Derechos "el derecho al agua y al saneamiento". Canaán, asentamiento humano creado a raíz del terremoto del 12 de enero de 2010 por decreto presidencial, y habitado por las víctimas de este hecho, constituye en sí mismo un verdadero laboratorio de campo que permite comprobar la veracidad de tal aseveración. El objetivo de este trabajo es analizar a la luz de las principales tendencias en la gobernanza global del agua, el derecho al agua, uno de los derechos humanos fundamentales, en Canaán.

**Palabras clave:** derecho al agua, gestión del agua, gobernanza, participación ciudadana, ciclo hidro-social, Canaán.

- 1 Université Quisqueya, Centre de Recherche et d'Appui aux Politiques Urbaines (CRAPU), 218 avenue Jean Paul II, Haut de Turgeau, Port-au-Prince, Haïti
- 2 Université des Antilles - Laboratoire de recherche GEODE Caraïbe (EA 929), Campus de Schoelcher, Faculté des lettres et sciences humaines, BP 7207, 97275 Schoelcher Cedex, Martinique
- 3 Association Haïtienne Femmes, Science et Technologie (AHFST), 218 Avenue Jean Paul II, Haut de Turgeau, Port-au-Prince, Haïti
- 4 Université Quisqueya – École doctorale "Société et Environnement" (EDSE), 218 Avenue Jean Paul II, Haut de Turgeau, Port-au-Prince, Haïti. evens.emmanuel@uniq.edu.ht

## 1. INTRODUCTION

Large cities in developing countries are, among other things, characterized by disorganized urban planning. Rural-urban migration is on a larger scale and government control of the urbanization process is often deficient, leading to a disorderly territorial expansion of the city (Dumas, 2018). The phenomenon of uncontrolled precarious urbanization, observed in the urban spaces of cities in the South, most often leads to the creation of new human settlements, which are deprived of basic services, such as the supply of drinking water and water sanitation. In the absence of planning and control of land use, the territory suffers a significant loss of plant cover (Sachs, 1981; United Nations, 2015).

The disorderly urban sprawl generates an artificial use of the grounds by an urban development which is most often precarious. This form of use is not without consequences on the health of the inhabitants and on the biological balance of natural ecosystems (Scalenghe and Marsan, 2009). Indeed, the proliferation of slums in the cities of the South, resulting from the mismatch between population growth and certain choices of urban space planning policies, has an unfavorable effect on green spaces through deforestation, hydrological cycle by reducing the permeability of surfaces. This urban social phenomenon causes significant disturbances in the recharge of groundwater and an increase in the rate of storm water runoff (Arcova et al., 2003). For Arnold and Gibbon (1996), soil waterproofing has serious consequences on various dynamics of the water cycle. Porter-Bopp et al. (2011) note that waterproofing soils generates the creation of heat islands.

In Haiti, 98% of cities are located in a dual ecosystem: that of the mountains, and that of low-lying or coastal areas (Holly, 1999). The development of the slums characterizing, among others, the metropolitan area of Port-au-Prince, is in times of rain the cause of two serious environmental problems observed: (a) the dispersion of solid domestic waste (Bras, 2010), therefore of pollutants, (b) the flooding of the bottom of this urban region.

The absence of a comprehensive urban development policy explains certain environmental problems facing the metropolitan area of Port-au-Prince (Fifi, 2010). Indeed, Bras et al. (2009) report that around

35% of solid waste produced in Port-au-Prince is collected by the public service responsible for garbage collection. According to Fifi (2010), "many of the city's roads, rivers and other open areas serve as dumping grounds, causing significant health and environmental problems. Note that the inefficiency of the solid waste collection and management system can contribute not only to the pollution of available water resources but also to the emergence of infectious and chronic diseases in the population". In precarious neighborhoods near the coast of Port-au-Prince, 25% of people surveyed by Bras (2010) directly associate skin conditions, being very widespread in the area, with unsanitary conditions (lack of latrine, collection slide, etc ...) prevailing there.

In addition, dynamic regional and global pressures, such as climate change, population growth and the degradation of urban infrastructure that cities undergo today, cause water scarcity, making it difficult to effectively manage resources in water (Jérôme, 2018). Taken in the prism of environmental conditions and the way in which the metropolitan area of Port-au-Prince is to be developed, this situation not only deprives the populations of the slums of this vital element, but also violates one of their fundamental rights "the right to water and sanitation" (Jérôme et al, 2021). Canaan, a human establishment created following the earthquake of January 12, 2010 by presidential decree, and inhabited by the victims of this event, constitutes in itself a real field laboratory allowing testing the veracity of this assertion. The objective of this work is to analyze in the light of the major trends in global water governance, the right to water, one of the fundamental human rights, in Canaan.

### *The right to water and the dynamics of global water governance*

Since the dawn of history, a vital need has accompanied humans in establishing hamlets, villages or towns: the need to have access to water (Rattu, 2015). Domestic needs (drinking, food preparation, personal and housing hygiene), irrigation of plants and the production of goods and services (especially industrial needs) are, both in developing countries and in industrialized countries, the main uses of water. The exponential increase in the population, characterized in terms of water by an increased increase in demand for water and the

generation of an increasing volume of wastewater, widens gaps or inequalities between populations and users. The deforestation of the watersheds supplying the water points, the inequitable distribution of fresh water (surface and underground) and the impact of global changes on rainfall give rise to a situation of scarcity that hydrologists call "water stress," which generate tensions between users.

In addition to its capital importance for the survival of living beings, water is a revealing element of social transformations in the interrelationships between agents/actors (Traoré, 2012). According to Torre et al., (2006), the conflict dimension is always presented as essential in the processes of land use planning, regional development or the management of various local functions, whether we are interested in activities linked to agriculture and water, the establishment of public infrastructure, the management of pollution and its consequences, the problems of the residential economy and peri-urbanization, or the effects of increased tourist pressure in coastal or mountain areas. Taking into account and managing the tensions and controversies that arise from the development of these different activities and sometimes hamper their progress are today considered essential, which several researchers and institutions have identified and developed a particular category of conflicts, dedicated for this purpose, conflicts of use and neighborhood (Charlier, 1999; Torre and Caron, 2002; Dziejzicki, 2003; CGP, 2005; Torre et al., 2006).

Traoré (2012) notes "The gap between the availability of water points and water requirements is widening daily. It leads all users, particularly customary leaders, to adopt certain behaviors for access to and management of water resources with regard to their social group. Indeed, the lack of water feeds the representations that social actors have of this resource in a world in full demographic explosion and socioeconomic change." The internationalization of the problems posed by the non-satisfaction of the water needs of the majority of populations, both in rural and urban areas, impose on international institutions which are dedicated to the maintenance of peace between peoples, of dignity and of human equality for the construction of a healthy planet to make the management of water-related conflicts an object of research and actions of international policy.

The right to water has its origins in the Universal Declaration of Human Rights. Indeed, the first recital

of the preamble of the said declaration, adopted by the United Nations General Assembly by 58 Member States, states: "The recognition of the inherent dignity of all members of the human family and of their equal and inalienable rights constitutes the foundation of freedom, justice and peace in the world" (United Nations, 1948). In its article 22, where water at the time was considered a social human right, it is stated "Everyone, as a member of society, has the right to social security; it is founded on obtaining the satisfaction of the economic, social and cultural rights essential to his dignity and to the free development of his personality, thanks to national effort and international cooperation, taking into account the organization and resources of each country".

The adoption of the Universal Declaration of Human Rights (UN, 1948) to that of Resolution 64/292 of July 28, 2010 in which the General Assembly recognized that the right to drinking water and sanitation was a fundamental right, essential for the full enjoyment of life and the exercise of all human rights (United Nations (2010), Tabi (2014) points out that the normative statement of the right to water was discussed and was developed within UN bodies, in particular the International Covenant on Social, Economic and Cultural Rights of 1966, and the Committee on Economic, Social and Cultural Rights. Indeed, this Committee responsible for monitoring the implementation of the 1966 International Covenant, adopted in 2002 a General Comment No. 15 entitled "The right to water" which puts an end to a period of uncertainty on the status of water right among the fundamental rights protected by the Covenant.

According to this general observation, underlines WHO (2002), "Water is essential for life and health. The human right to water is therefore fundamental for him to be able to live a healthy and dignified life. This is the precondition for the realization of all his other rights. "It is with these words that the United Nations Committee for Economic, Social and Cultural Rights today took the unprecedented initiative to include a "general comment" on water as a human right. By "general comment" is meant an interpretation of the provisions of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights. The 148 countries that have ratified it will now be required to progressively achieve universal access to safe and healthy drinking water and sanitation, equitably and without discrimination.

The notion of equity, which refers to the quality consisting in providing each human being with the minimum quantity of drinking water allowing him to lead a healthy life by reference to the statements of resolution 64/292 (United Nations 2010), as well that the notion of absence of discrimination, translating in this analysis the absence of distinction and treatment in the supply of water to the populations of the slums of the metropolitan area of Port-au-Prince, in particular Canaan, in relation to the rest of the community, lead to a questioning of the role accorded to water in the definition of policies for the development and urban rehabilitation of precarious neighborhoods in Haiti.

## 2. METHODOLOGY

### *Environmental and historical context of the creation of Canaan*

In recent decades, Haiti has recorded several major environmental events (floods, droughts, cyclones and a magnitude 7.2 Richter scale earthquake). Most of these natural phenomena usually turn into natural disasters that impact the life and property of the

population. They also lead to the displacement and unplanned relocation of some inhabitants. The earthquake of January 12, 2010, among other things, left nearly 300,000 dead, 300,000 injured and over two million displaced. This event made the metropolitan area of Port-au-Prince the object of very strong population growth and a massive extension of precarious urban spaces. This development is the result of both the natural growth of the population, a strong influx of migration and the lack of housing availability. Access to drinking water and sanitation infrastructure in the newly densified areas has since been systematically lacking. This is typically the case with Canaan, which at the end of 2016 had more than 250,000 inhabitants in an almost uninhabited area before the 2010 earthquake (Bodson et al, 2017).

### *Presentation of the study area*

Canaan's geographic coordinates are 18° 38' 46" N, 72° 16' 23" W. It is located in the far north of the metropolitan area of Port-au-Prince, approximately 18 km from downtown town, precisely on a dwelling called formerly Corail Cesselesse, of the communal section of Varreux II, Commune of Croix-des-Bouquets. Figure 1 presents the map of Canaan.

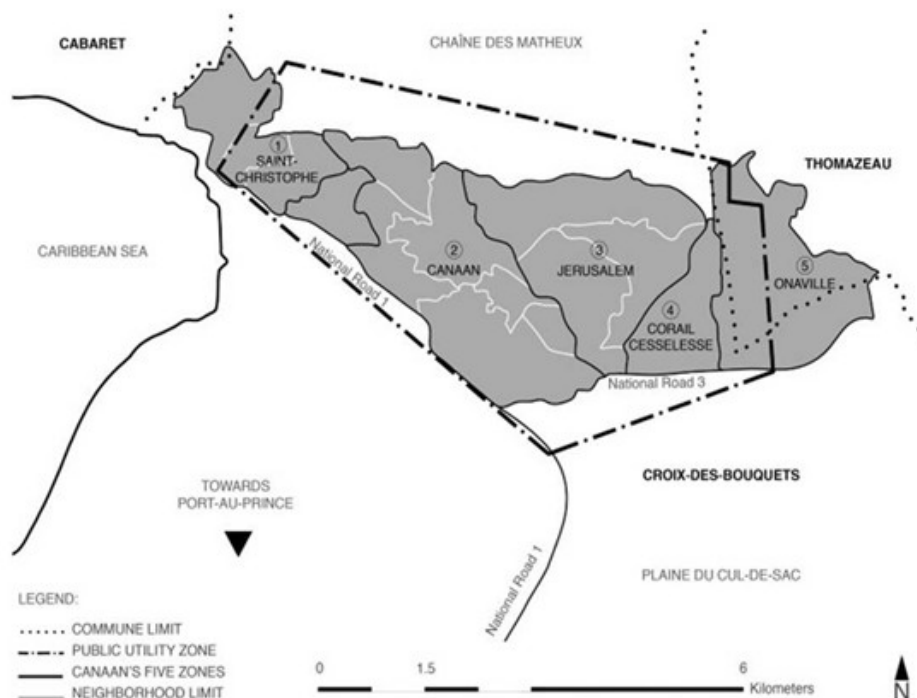


Figure 8: Map of Canaan (Petter et., 2020)

According to OXFAM GB, (2014) “The areas of Canaan, Jerusalem and Onanville are located in the “Low Mountains” agro-ecological area of the commune of Croix-des-Bouquet. This area has an annual rainfall between 1000mm and 1400mm. The Canaan area is located between the fertile Cul-de-Sac plain and the foot of the deforested Chaîne des Matheux. Soil degradation, the absence of vegetation in the watersheds, the exploitation of quarries have reduced infiltration and retention potential, increased hydrological threats and land movements and left dry aquifers”.

Before the earthquake, the territory was almost unoccupied. As such, it was the subject of a first declaration of public utility in 1971 for tourist purposes. A tourism master plan, drawn up by the Western Tourism Development Bureau, was being implemented before the earthquake, while various large-scale private projects were being considered as part of the North Pole Urban Development Master Plan (Verret et al., 2016) The decree of March 22, 2010 declaring land in the Canaan area of public utility "for the purpose of relocating victims of the earthquake of January 12, 2010 (Le Moniteur, 2010). Decree declaring of public utility the properties extending from the angle of the Rivière Bretelle to the national road number 1 through Bon Repos and Corail-Cesselesse forming a polygon with the area commonly called Cucumber, article 1, and March 22

decree. Opened the field to a radical and rapid transformation of this space. From undergrowth to makeshift camps sheltering victims from the surrounding area and elsewhere and migrants from provinces, Canaan has urbanized into a "new city" of nearly 300,000 inhabitants. There followed a very rapid "spontaneous" occupation of the territory. Photo 1 (OXFAM GB, 2014) shows the uncontrolled expansion of Canaan especially in the area of alluvial fans.

The environmental assessment carried out by OXFAM GB (2014) shows that hydrological threats are linked mainly to gullies, which capture runoff from large watersheds in the northern mountains. The immediate consequences of tropical storms, hurricanes and cyclones are rainfall of several hundred millimeters in a few hours; the gully causes extensive flooding and a risk of erosion for Canaan, the Coral Camp and areas of Onanville.

In addition, the Canaan area is the most socially and environmentally vulnerable in the commune of Croix-des-Bouquets. Canaan lacks urban infrastructure and has a special environment: schools, hospitals, insufficient water resources, drought etc. Canaan’s main productive activities are rock mining and quarrying, which are unchecked and without safety standards and which increase both erosion and the threat of land movement. Photo 2 shows a facade of the quarry extraction areas.



Photo 1: Uncontrolled expansion of Canaan in the area of alluvial fans (OXFAM GB, 2014)



Photo 2: Facade of quarry extraction areas (OXFAM GB, 2014)

### Methods

This work is part of the Water in human settlements of the future theme of the research axis "Infrastructures and Sustainable Cities" of the Center for Research and Support for Urban Policies (CRAPU) of Quisqueya University. Within this axis, CRAPU to observe in the new slums of the metropolitan area of Port-au-Prince the role of social behavior with regard to water, by questioning the applicability of the theoretical framework proposed for the integrated management of water resources in the service of human settlements of the future by the International Hydrological Program (IHP) of UNESCO (2012) for its phase IHP-VIII. In a context of urban sprawl marked by uncontrolled demographic growth and a deficiency in urban governance, juxtaposed with very difficult socioeconomic situations, a degraded geophysical environment vulnerable to cyclones, earthquakes and climate change, the scarcity of fresh water and the pollution of available water resources, researchers from this laboratory who work on the aforementioned theme are trying to develop theoretical tools ultimately making it possible to model the social management of water in precarious neighborhoods.

Canaan, a human establishment, which is in line with the ineffectiveness of several actors in terms of urban planning, provision of basic services, development

and management of inhabited spaces, has been selected for the conduct of several surveys on water issues in the Port-au-Prince slums. Certain information obtained in Canaan on: (i) the socioeconomic characteristics of the households surveyed, (ii) the water market, has been published (Jérôme et al, 2017, 2018, 2021).

For the conduct of this work, we relied on: (i) field observations, (ii) documentary analysis (laws, decrees, acts, reports, studies), and certain not yet exploited results of the surveys carried out. .

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Summary of information on water supply and the characteristics of households included in the sample

- In Canaan, 2.5% of the heads of households attended university, 31% have a high school education, and 21.41% have completed the second cycle of Haitian fundamental education. 28.47% have completed studies for the third cycle of Haitian basic education and 8.8% have never attended school (Jérôme et al, 2017);
- Households included in the sample have characteristics similar to those highlighted by the IHSI-DIAL 2012 survey for the metropolitan area (Bodson et al, 2018);

- 92% of household heads consider themselves to be owners despite the ambiguity of the special status of the territory declared "of public utility". Whatever the motivation for arriving in Canaan (82% of household heads admit that they took refuge there under the constraint of living conditions after the earthquake), self-construction is widespread. 4.56% of the households surveyed nevertheless have a home provided by humanitarian aid (Jérôme et al, 2017, Bodson et al, 2018).
- The households in the sample have an average of 5.11 people. In the metropolitan area, this average is 4.5. There are many under 18s in the households surveyed: 2.25 on average per household, which at least partially explains the difference observed compared to the metropolitan area (Bodson et al, 2018). 93% of the water distribution points in Canaan have been built by families, and thus becomes a private water supply facility. Only 7% have a collective, associative or public status. These were built by NGOs or charitable institutions, or by a public institution or a group of people in the locality. Access to 95% of these water points must be paid for, while only 5% offer a free service (Jérôme et al, 2017).
- 25% of households spend more than 24% of their monthly income on water supply (Jérôme et al, 2017).

These results highlight the existence of several water supply services in Canaan. This diversity of suppliers can become a source of conflict between the regulator and the tax authorities on the one hand, and the priorities of these services on the other. Indeed, the development of housing in Canaan as well as its demographic growth will inevitably lead to the establishment of public systems capable of ensuring the quality of the water that will be delivered to the population. Depending on the management model adopted for the supply of this public service, and the methodology adopted to set the price of water, these public systems could find themselves in a form of competition with the providers of the early days, a situation which would lead to on conflicts between suppliers. Finally, it will be the popular that would be depriving of their right to water.

For several years, we have noticed that the concept of participation appears at the heart of discourse on sustainable development, good governance and environmental management. At each level of

intervention, underlines Gliemann (2013), users, citizens and all those who have a certain interest are encouraged to get involved and organize themselves to take part collectively in the development of their communities and in the management. of their resources. The participatory approach, a privileged tool making it possible to involve populations in an active and responsible manner, was born from the observation of the failure of intervention strategies recommended in the past, as well as from the fairly recent desire of governments to integrate the dimension participation of the populations in the development policies of their region (FAO, 1995). Participatory democracy in water management, as defined today by international, national and local institutions around the world can lead to effective participation of users /citizens and private providers/citizens. In the footsteps of the Breuil work (2004), the proposal formulated to the actors responsible for supplying drinking water on the diversity of suppliers observed in Canaan, is to arrive at socially clearing a renewed vision of the PPP (public private partnership) for the management of water services in the slums of Haiti, by giving a central place to the service of the poor populations.

#### *The high cost of water*

In interviews with economists on the high weight of water in the budget of certain families, that is to say more than 24%, the majority of them underline that in certain economies this percentage in the income of a family is the most often this is allocated to paying mortgage fees on the house.

Ashley and Cashman (2006) note that people in the developed world and the better-off in developing countries do not pay the real economic costs of water services, the poorest have to buy water from local distributors or the bottled water that they pay 500 times more than their wealthier fellow citizens.

In Canaan, the water offered is 93% chargeable. According to the indications provided by the field surveys, the average expenditure per liter differentiates between the 6 blocks constituting this human settlement (Canaan 1, 2, 3, 4, 5 Bellevue). This contrast is in all likelihood based on taking into account the different access and delivery difficulties in the two groups of sectors. Indeed, among the points there are 167 storage tanks, which are supplied by tankers coming from the boreholes of the Plaine du Cul-de-Sac. The refloating of the storage tanks is done in an interval of 5 to 90 days. On average, the



water points wait at least 20 days before a next supply by tanker.

#### *The water supply in Canaan*

In Canaan, the government, and more specifically the National Directorate for Drinking Water and Sanitation (DINEPA), is not yet involved in providing water for human consumption. The water supply is a private matter. The surveys identified 179 water points belonging to individuals, community groups and humanitarian organizations (Jérôme et al, 2017). These forms of mobilization open up new fields of research to approach the management of water in slums not only on the basis of the alternative participation of citizens / users, but also under that of the understanding of the technical objects in the supply of water in Canaan.

In fact, the vast majority of water points identified during the two surveys, i.e. 71.5%, are made up of storage tanks used for the sale of water, while non-equipped wells represent less than 3% (i.e. 2.23%), boreholes equipped with hand pumps 3.91% and collective impluviums less than 1% (0.56% or about 6 out of 1000 water points). Storage tanks cover almost the entire water supply. Hand pumps, unequipped wells and impluviums provide 7% of the available water. These equipments, works or infrastructures, or technical objects give rise, in the case of water in Canaan, to a new understanding of the assertion of Linton and Budds (2014) in which they consider that water in the hydrosocial cycle is always "produced", it is good that it is always and above all linked to a technical object. The existence and the weight of private water storage reservoirs for sale to the population, wells equipped with hand pumps in the supply of water to the population of Canaan makes it possible to segment the water market into three large compartments, each of which is controlled by a different group of players. First, we find the suppliers of storage tanks. These reservoirs are supplied with water from tank trucks coming from the Plaine du Cul-de-Sac. The drivers of these trucks get their supplies directly from the water wells. The second segment consists of the owners of private reservoirs for storing and selling water to the population. The third is represented by the users of boreholes equipped with hand pumps adopting a governance model based on a water management cooperative with a committee of three to four members. Beneficiaries of funding from international or humanitarian organizations, they organize themselves to sell water to members of the

cooperative at a cost half the price of other storage providers from the cul-de-sac plain.

The use of the water supply system in Canaan to test the applicability of hydro-social cycle theory in slum water management to some extent confirmed the hypothesis of the thinkers of this theory namely that water is a co-production of nature and societies. By maintaining the chosen experimental scale, in the future, it will be necessary to focus attention on the harmonious or conflicting relations that can develop between the actors the management methods adopted for boreholes equipped with hand pumps versus those applied in the sale of water contained in storage tanks.

#### **4. CONCLUSION**

The objective of this work is to analyze in the light of the major trends in global water governance, the right to water, one of the fundamental human rights, in Canaan.

The absence of the public authority in charge of water supply and the urgent need for the population to obtain water, have enabled a pyramid of private and humanitarian actors to offer water to the population. by integrating the natural, social and political contexts in which they are found, but also social issues that go beyond the technical dimensions of the water cycle, particularly in Canaan.

The information provided by the surveys identifies two technical objects that contribute more than 90% to the functioning of the "water supply system" in Canaan. Storage reservoirs and boreholes equipped with hand pumps now allow not only to understand the relationship that the population has with water, but to identify the types of actors who have access, control and control the resources in water. The reservoirs provide a sales service according to the law of the maximum profile, while the boreholes approach the water market under the basis of a governance model based on a water cooperative and participatory management where users contribute in the definition of the actions to be implemented from the profits generated by the sale of water.

In the future, it will be necessary to analyze the contribution of water infrastructure in the reconfiguration of space, to assess the level of application of the theory of the hydro-social cycle in the supply of water to the population of this slum. It would then be relevant to approach the model of

governance and / or management of water in Canaan from the angle of reconciliation between the "hydro-social cycle" and the hydrological reality.

Open Society Foundation Haiti, the Agence universitaire de la Francophonie (AUF), the Representation of the Institute of Research for Development (IRD) in Mexico, Cuba and Haiti, and the AOG (Association Communautaire Paysanne des Originaires de Grande Plaine), for their support in carrying out this study.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are thankful to the "One Health" University Space of Quisqueya University, FOKAL-

## REFERENCES

- Annan K. (2001). Message du 22 mars 2001 pour la Journée mondiale de l'eau. "Pouvoir s'approvisionner en eau potable est un besoin élémentaire et, partant, un droit fondamental", site [www.worldwaterday.org](http://www.worldwaterday.org).
- Arnold Jr, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American planning Association*, 62 (2): 243-258. <https://doi.org/10.1080/01944369608975688>
- Ashley, R., & Cashman, A (2006). Incidences du changement sur la demande à long terme d'infrastructures dans le secteur d'eau. OCDE-Organisation de Coopération et de Développement Économiques. Programme de l'OCDE sur l'Avenir. Les infrastructures à l'horizon, 2030. DOI:10.1787/9789264024014-6-FR. ISBN 92-64-02400-X
- Bras, A., *Éléments pour une définition de la problématique de la propreté urbaine en Haïti : Le cas de Port-au-Prince*. Thèse de Doctorat (en cotutelle). Lyon: INSA de Lyon / Université Quisqueya, 2010, 213 p.
- Bras, A., Berdier, C., Emmanuel, E., Zimmerman, M. Problems and current practices of solid waste management in Port-au-Prince (Haïti). *Waste Management*, 2009, vol. 29, pp. 2907-2910. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.07.015
- Breuil, L. (2004). *Renouveler le partenariat public-privé pour les services d'eau dans les pays en développement: comment conjuguer les dimensions contractuelles, institutionnelles et participatives de la gouvernance* (Doctoral dissertation, Doctorat, Sciences de l'eau-Gestion, ENGREF).
- Caron, A., Torre, A., 2002, « Les conflits d'usage et de voisinage dans les espaces ruraux : une analyse économique », in PERRIER-CORNET P. (dir.), *À qui appartient l'espace rural ? Enjeux publics et politiques*, éditions de l'Aube/DATAR, La Tour d'Aigues, p. 49-78.
- CGP (Commissariat général du plan). *Projet Manon*. (2005). *Conflits d'usage à l'horizon 2020: quels nouveaux rôles pour l'État dans les espaces ruraux et périurbains*. Documentation française.
- Charlier, B. (1999). *Géographie des conflits environnementaux depuis 1974*. Géographie. Pau, Université de Pau, 543.
- Chirac J. (2003). *Message au Troisième Forum Mondial de l'Eau*, mars 2003.
- Conférence internationale sur l'eau et l'environnement, Dublin, 1992, *Déclaration de Dublin sur l'eau dans la perspective d'un développement durable*, Dublin. [http://www.unesco.org/water/wwap/milestones/index\\_fr.shtml](http://www.unesco.org/water/wwap/milestones/index_fr.shtml)
- Dumas, R. M. (2018). *Les enjeux politiques de la gouvernance environnementale: le cas de la gestion des eaux de surface à São Paulo*. Mémoire de Maîtrise en sciences géographiques, Université Laval. Québec: Université Laval. 201p.
- Dziedzicki, J. M. (2003). II. *La gestion des conflits d'aménagement entre participation du public et médiation*. *Annuaire des collectivités locales*, 23(1), 635-646.
- FAO (1995). *Approche participative, communication et gestion des ressources forestières en Afrique Saharienne : bilan et perspectives*. Disponible sur : [www.academia.edu/15169730](http://www.academia.edu/15169730) . Consulté le 28 aout 2016.

- Fifi, U. (2010). Impacts des eaux pluviales urbaines sur les eaux souterraines dans les pays en développement—mécanismes de transfert des métaux lourds à travers un sol modèle de port-au-prince, Thèse de Doctorat (en cotutelle). Lyon: INSA de Lyon / Université Quisqueya, 2010,.
- Gliemann M.O. (2013). Une gestion participative de l'eau ? La politique sud-africaine de gestion locale de l'eau. Lesedi, les carnets de recherche de l'Institut Français d'Afrique du Sud. Disponible sur : <http://ifas.hypotheses.org/211> . Consulté le 23 février 2017.
- Haïti (Doctoral dissertation, Université Quisqueya (Port-au-Prince); Institut National des Sciences Appliquées de Lyon).
- Holly, G. (1999). Les problèmes environnementaux de la région métropolitaine de Port-au-Prince. Port-au-Prince, ouvrage collectif, Commission pour la commémoration du 250<sup>e</sup> anniversaire de la fondation de la ville de Port-au-Prince. Port-au-Prince (Haïti) : Presses nationales. 174p.
- Jérôme, Y., Alexis, M., Telcy, D., Saffache, P., Emmanuel, E. (2021). The challenge of water in the sanitary conditions of the populations living in the slums of Port-au-Prince: The case of Canaan. In .: Environmental Health (ISBN 978-1-83968-721-1). On press.
- Jérôme, Y. (2018). Cycle hydrosocial et la gestion de l'eau dans les bidonvilles du sud : étude de cas de Canaan. Communication orale – 20<sup>e</sup> rencontre internationale d'APERAU, 19 au 22 juin 2018, Lille, France.
- Jérôme Y., Emmanuel E., Roy P.-M., Bodson P., (2017). The issue of water in slums development in Haiti: the case study of Canaan. Aqua-LAC, Vol. 9 (1):87-97.
- Linton J., (2010). What is water? The history of a modern abstraction. Vancouver: UBC Press.
- Nations Unies (2010). Le droit de l'homme à l'eau et à l'assainissement. Résolution du 28 juillet 2010 de l'Assemblée générale de l'ONU., Doc. NU.A/RES- 64/292
- Nations Unies (1948). Déclaration universelle des droits de l'homme. Département de l'information de l'ONU. <https://www.un.org/fr/universal-declaration-human-rights/index.html>
- Noël, R. (2012). Reconstruction et environnement dans la région métropolitaine : Cas de Canaan ou la naissance d'un quartier ex-nihilo. Port-au-Prince: Group URD. [http://www.urd.org/IMG/pdf/ReconstructionetEnvironnement\\_Rapport\\_Canaan\\_Nov2012.pdf](http://www.urd.org/IMG/pdf/ReconstructionetEnvironnement_Rapport_Canaan_Nov2012.pdf)
- Nuttle, W. K., (2002). Is ecohydrology one idea or many? Hydrological Sciences Journal, 47(5), 805-807. doi: 10.1080/02626660209492983.
- OMS (2002). Le droit de l'être humain à l'eau est donc fondamental. Observation générale N°15. Pacte International relatif aux droits sociaux économiques et culturels (PIDESC). Communiqué de presse de l'Organisation mondiale de la santé, 27 novembre 2002.
- OXFAM GB (2014). Rapport final d'évaluation technique des menaces naturelles de la commune de Croix-des-Bouquets (Haïti) - Guide méthodologique. Londres: OXFAM GB. 77p. [https://www.preventionweb.net/files/38544\\_38544rapportconsultationcartographi.pdf](https://www.preventionweb.net/files/38544_38544rapportconsultationcartographi.pdf)
- Petter, A. M., Labbé, D., Lizarralde, G., & Goulet, J. (2020). City profile: Canaan, Haiti-A new post disaster city. Cities, 104, 102805.
- Porter-Bopp, S., Brandes, O. M., Sandborn, C., & Brandes, L. (2011). Peeling Back the Pavement: A Blueprint for Reinventing Rainwater Management in Canada's Communities. POLIS Project on Ecological Governance, University of Victoria & Environmental Law Centre, University of Victoria. 72p. ISBN 978-1-55058-389-2
- Scalenghe, R., & Marsan, F. A. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. Landscape and urban planning, 90 (1-2):1-10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.011>
- Schmidt J. J., (2014). Historicising the Hydrosocial Cycle. Water Alternatives, 7 (1), 220-234. Disponible sur: [www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol7/v7issue1/242-a7-1-13/file](http://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol7/v7issue1/242-a7-1-13/file)

- Smets, H. (2004). Droit Effectif a l'eau Potable, Un. Env'tl. Pol'y & L., 34, 175.
- Soriano, F. C. A., de Cicco, V., & Bueno, P. A. R. (2003). Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha-São Paulo. *Revista Árvore*, 27(2), 257-262.
- Tabi, M. T. (2014). L'accès aux nouveaux droits fondamentaux est-il compatible avec le principe de contreparties? Le cas du droit humain à l'eau. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00952294>
- Torre, A., Aznar, O., Bonin, M., Caron, A., Chia, E., Galman, M. . & Kirat, T. (2006). Conflits et tensions autour des usages de l'espace dans les territoires ruraux et périurbains. Le cas de six zones géographiques françaises [\*]. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, 3(3), 415-453. <https://doi.org/10.3917/relu.063.0415>
- Traoré, R. (2012). Eau, territoire et conflits: analyse des enjeux de la gestion communautaire de l'eau au Burkina Faso: l'exemple du bassin versant du Nakambé (Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II). NNT : 2012TOU20035. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00718597>
- UNESCO (2012). Plan stratégique de la huitième phase de son Programme Hydrologique International (PHI-VIII : 2014-2021).
- United Nations (2015). *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. New York, NY: United Nations.

*Como citar este artículo:*

Jérôme, Y., Emmanuel, E., Saffache, P. (2020). Global water governance and water rights through the prism of Canaan, a slum apart in Haiti. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 34-44. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-03



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

## CONSUMO DE ENERGÍA EN PLANTAS DE TRATAMIENTO – BENCHMARKING

*Energy consumption in treatment plants - benchmarking*

Aqua-LAC  
Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

Florentino Vázquez A.<sup>1</sup>, Kharla Aguilar L.<sup>2</sup>, Víctor Villagrana R.<sup>3</sup>  
Jimmy Loaiza N.<sup>4\*</sup>

Recibido: 23/02/2021

Aceptado: 14/03/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Se presenta consumo de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales en el Estado de Nuevo León, México a cargo de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), utilizando tres indicadores: consumo de energía por población equivalente (kWh/PE/año), por kg removido de demanda bioquímica de oxígeno (kWh/kg DBO), y por metro cúbico tratado (kWh/m<sup>3</sup>); se observan resultados excelentes en las plantas bajo estudio, casi el 90% del agua residual que se trata en la Entidad ocupa menos energía que los señalados en el límite bajo de los criterios considerados, apenas planta Santa Rosa estaría en el rango respecto a kWh/m<sup>3</sup> y kWh/PE/año, ya que entre 2014 y 2015 tuvieron lugar libranzas por trabajos de expansión. También se investigó en la red los índices energéticos de otras plantas de tratamiento de similar tamaño, pudiendo ver que ostentan índices que facialmente duplican los que tiene SADM, lo que las ubica en buena posición en un ejercicio de Benchmarking de primer nivel.

**Palabras clave:** planta de tratamiento, consumo de energía, benchmarking.

### Abstract

*Energy consumption is presented in wastewater treatment plants in State of Nuevo Leon State, Mexico, operated by Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), using three indicators: energy consumption by equivalent population (kWh/PE/year), per kg removed of biochemical oxygen demand (kWh/kg BOD), and per cubic meter treated (kWh/m<sup>3</sup>). Excellent results are observed in the plants under study, almost 90% of the wastewater that is treated in Nuevo Leon uses less energy than those indicated in the lower limit of the criteria considered, only Santa Rosa plant would be in the range with respect to kWh/m<sup>3</sup> and kWh/PE/year, since between 2014 and 2015 there were drafts for expansion works. The energy indices of other treatment plants of similar size were also investigated online, and it was possible to see that they have indices that are facially double those of SADM, which places them in a good position in a first-level benchmarking exercise.*

**Keywords:** Treatment plant, energy consumption, benchmarking.

1 Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey SADM. Director de Proyectos, Operación y Saneamiento. fayala@sadm.go.mx

2 Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey SADM. Coordinador de Saneamiento. kaguilar@sadm.gob.mx

3 Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey SADM. Gerente de Tratamiento. vvillagrana@sadm.gob.mx

4 Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey SADM. Asistente Técnico. jloaiza@sadm.go.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua y la energía están relacionadas en una suerte de condición reversible que puede tornarse en un círculo virtuoso cuando ésta se utiliza adecuadamente. La energía se requiere para acercar el agua desde las fuentes hasta las ciudades para calmar la sed y las necesidades de la población, así como para los procesos de saneamiento; y por otro lado, el agua posee energía potencial que puede convertirse en energía eléctrica en las plantas hidroeléctricas y/o a través del vapor para mover máquinas.

Respecto al tratamiento de aguas residuales, existen varios métodos y procesos para tal fin; el enfoque más común utiliza un pre-tratamiento (cribado, desarenado, bombeo de influente, entre otros),

seguido de la clarificación primaria (opcional), para continuar con el tratamiento secundario de lodos activados (crecimiento aeróbico con biomasa suspendida) y la desinfección con cloro para reducir los patógenos. Adicionalmente está el tratamiento integral de bio-sólidos.

A mayor abundamiento, el proceso de aeración es el mayor consumidor de energía (50 a 70% del total), seguida por bombeo de aguas y lodos, digestión y desaguado de lodos. Ver figura 1. Aunque el proceso de lodos activados es el más utilizado, no suele ser muy eficiente en cuanto al consumo de energía, ya que la energía para mantener condiciones aeróbicas en los reactores es intensiva, como lo sugieren los operadores de las plantas de tratamiento.

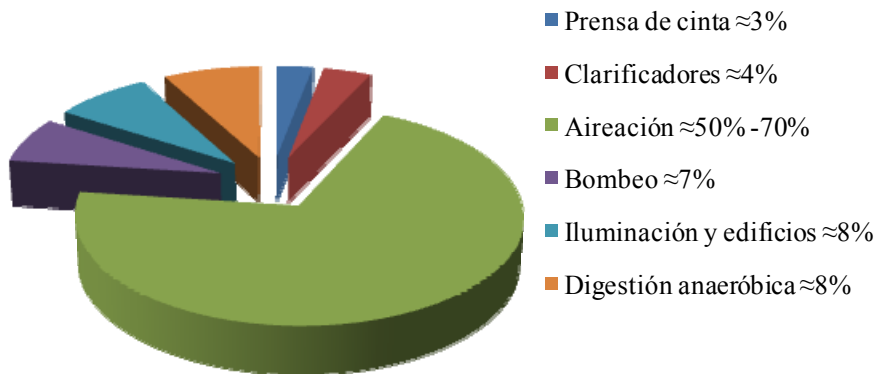


Figura 1. Requisitos de energía plantas de tratamiento

Las lagunas aeradas, filtros percoladores y discos rotatorios biológicos pudieran requerir menos energía, pero no han sido populares debido a que, por ejemplo, las lagunas aeradas requieren extensa superficie de terreno, mientras que los filtros percoladores y discos rotatorios biológicos no alcanzan el grado de calidad requerido para el reuso, por lo que suelen ser más aptos para aplicaciones en zonas rurales y pequeñas comunidades.

Sin embargo, los investigadores continúan en la búsqueda de sistemas y/o equipos que puedan hacer más eficiente el tratamiento, ya que en EU el consumo de energía por tratamiento de aguas residuales representó un 0.6% de la producción total en 2008, con una tendencia a la alza debido a mayores restricciones en la calidad del efluente.

### *Crterios generales de benchmarking.-*

De acuerdo con las nuevas directrices, es menester enfocar los procesos de saneamiento al concepto de población equivalente, cuyo objetivo es determinar presencia de sobrecargas contaminantes con las que operan las plantas de tratamiento, que define como aportación per cápita 60 g DBO/d. Otro aspecto importante para descartar sesgo en el análisis, es el concepto de energía utilizada para remover la masa del parámetro de caracterización, que generalmente es la DBO. Finalmente está el parámetro más ampliamente utilizado y difundido para el Benchmarking que es la energía para tratar un volumen definido de agua residual ( $\text{kWh/m}^3$ ), como se indica en la figura 2.

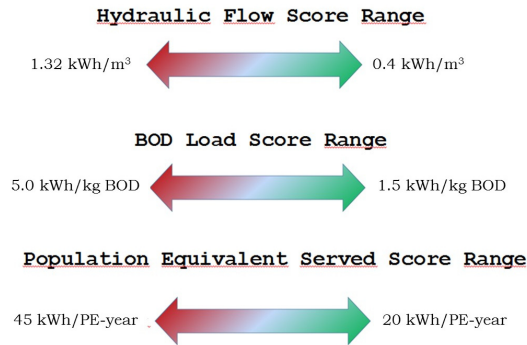


Figura 2. Rangos aceptables para consumo de energía en plantas de tratamiento (Fuente: Vanyo Jon C.E.M. (2018), Minnesota Technical Assistance Program)

En tal virtud, el presente documento preparado por la Gerencia de Tratamiento de SADM es con el fin de establecer puntos de cotejo entre las plantas de tratamiento que opera SADM y de esta forma distinguir áreas de oportunidad para alcanzar los objetivos estratégicos de la Alta Dirección, así como también para comparación con plantas de tratamiento similares en otras latitudes.

Por tal motivo, la Coordinación de Saneamiento actualiza mensualmente en el siguiente portal <https://web.sadm.gob.mx/areas/saneamiento> la información del volumen tratado, calidad del efluente y el consumo de energía en plantas AMM.



El volumen de agua en cada planta, actualizada a Diciembre 2020.

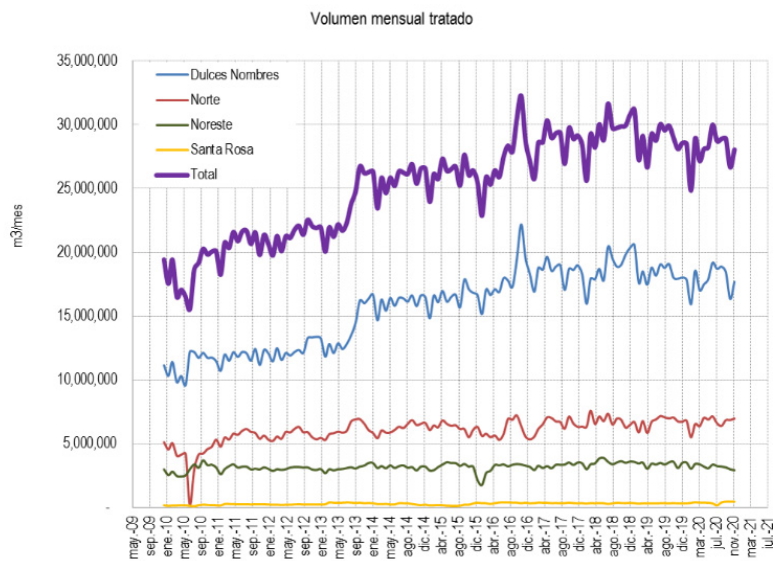


Figura 3. Imagen de la página <https://web.sadm.gob.mx/areas/saneamiento>

## 2. ANTECEDENTES

A lo largo de más de 20 años, el 100% de las aguas residuales que se generan en el Área Metropolitana de Monterrey se descargan al cuerpo receptor bajo tratamiento, en cumplimiento con NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo que han operado de manera eficaz y se ha establecido la rutina del seguimiento al consumo de energía eléctrica; ya que SADM mantiene en cuenta reservada los recursos presupuestados para el pago de este servicio (Operación y Saneamiento), con lo cual se subraya la importancia de asegurar la disponibilidad de energía para dichos procesos y hacer uso eficiente de este commodity, como dirían los economistas.

Adentrando en el ámbito de saneamiento en SADM, destacan las modificaciones al sistema de aeración en planta Dulces Nombres, al cambiar la planta de oxígeno por un sistema de difusores de fondo de burbuja fina (reemplazando un sistema de más de 8,000 HP por otro de 4,500 HP), en planta Noreste

también hubo modificaciones al reemplazar 20 turbinas de aeración de baja velocidad por difusores de fondo de burbuja fina (retirando equipos de 2,000 HP e instalando otro sistema de 1,200 HP) además de ampliar la capacidad de 500 a 1,000 L/s, sin requerir incremento en volumen de reactor.

Las anteriores acciones fueron motivadas por necesidades operativas y/o requerimiento de usuarios de agua residual tratada, más que buscando ahorro de energía, lo cual vino por consecuencia, sin embargo, es de destacar el diseño hidráulico de los tanques en ambas plantas (reactores biológicos tipo pistón) y las temperaturas de proceso (acorde a la ubicación y altitud), que contribuyeron a los logros que se mencionan.

Así mismo, es importante señalar en el presente documento, los indicadores que se tienen para el consumo de energía, y que forman parte del Sistema Institucional de Calidad (SIC), que se presentan a continuación. Ver figura 4.



### Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, IPD Objetivos de Calidad e Indicadores de la Gerencia de Tratamiento

Fecha Revisión 31-mayo-2020

OBJETIVO	INDICADOR	FÓRMULA	RESPONSABLE	PROCESO	INTERVALO MEDICIÓN	META
Consumo Energía	Consumo mensual de kWh respecto al volumen tratado (*1)	$EE = \frac{\text{Energía\_consumida\_kWh}}{\text{Volumen\_tratado\_m}^3}$	Superintendente	Plantas AMM	Mensual	< 0.33 kWh/m <sup>3</sup>
				Plantas NM > 10 L/s		< 1 kWh/m <sup>3</sup>
				Plantas NP < 10 L/s		< 1.5 kWh/m <sup>3</sup>

\*1er. Supuesto.- El cumplimiento de este indicador tiene dependencia del volumen tratado. Para fines de seguimiento de este indicador, el volumen tratado deberá ser mayor del 25% de la capacidad nominal, en caso contrario se tendrá que evaluar otras opciones que seguramente demandarán recursos de inversión, lo que puede tomar más tiempo en encontrar solución de fondo. Antecedentes.- En las plantas pequeñas se suele utilizar equipos de menor cuantía y que normalmente no están dotados de variación de frecuencia y es necesaria garantizar transferencia de oxígeno y mezclado

Figura 4. Extracto de objetivos e indicadores Gerencia de Tratamiento (2020)

Destacando que las plantas AMM (DN, N y NE) tienen como límite 0.33 kWh/m<sup>3</sup>, las plantas foráneas mayores a 10 L/s (incluyendo SR) hasta 1.0 kWh/m<sup>3</sup>, y las menores de 10 L/s tienen límite de 1.5 kWh/m<sup>3</sup>; en atención de que las plantas de mayor tamaño tienen siempre mejor desempeño en lo que se refiere a la utilización de energía, como lo señala la literatura.

## 3. METODOLOGÍA

Se realizó investigación en publicaciones en Internet, relacionadas con el consumo de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales, utilizando los tres indicadores señalados anteriormente: consumo de energía específico expresado por equivalentes de población (kWh/PE/año), por unidad de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) removida

(kWh/kgDBO), así como por metro cúbico tratado (kWh/m<sup>3</sup>).

Cabe mencionar que en las plantas de tratamiento del AMM, en ocasión del proyecto Monterrey IV (DN, N y NE), se decidió tener alimentación en 115 kv con la CFE, debido al nivel de consumo de energía (para lo cual se tuvo que costear la extensión de las líneas de transmisión), actualmente se tienen contratos con la tarifa DIST (Demanda Industrial en Sub-Transmisión) en dichas plantas. Para el caso de las demás plantas, la alimentación es en media tensión (34.5 o 13.8 kv) y corresponde a la tarifa GDMTH (Gran Demanda en Media Tensión Horaria) para SR y las plantas más importantes del área foránea, como es el caso de Linares.

Las anteriores tarifas incluyen horario punta, en el cual el costo por kWh es más oneroso, por lo que se llevan a cabo programas de ahorro de energía, que



incluye reducción de equipos en servicio durante dicho horario, principalmente de sopladores. Otras plantas foráneas tienen contrato en la tarifa GDMTO (Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria), la cual está exenta de horario punta.

En tal virtud, la Gerencia de Tratamiento gestiona la toda información pertinente con los formatos de ISO 9001:2015, como es el volumen tratado, concentración DBO de influente y efluente, así como la estimación de población que descarga en las cuencas de aportación de las plantas de tratamiento en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), información confiable de larga data para sustentar los reportes.

En las plantas del área metropolitana se tratan (promedio 2020) unos 11,000 L/s (250 MGD), de los cuales corresponden 7,000 L/s (159 MGD) a Dulces Nombres, 2,600 L/s (59 MGD) a Norte, 1,250 L/s (28.5 MGD) a Noreste y 150 L/s (3.5 MGD) a Santa Rosa. Por otro lado, y al ser un sitio de interés en el presente documento, la planta Linares que pertenece a la Zona Citrícola, trata en promedio 145 L/s (3.3 MGD), similar a SR.

En esta planta recientemente se instaló a manera de prueba un turbo soplador de 200 HP, previo a su instalación, el consumo diario era de 5,364 kWh/d y posteriormente promedió 3,910 kWh/d, lo que representa 27% en ahorro de energía. Ver figura 5.

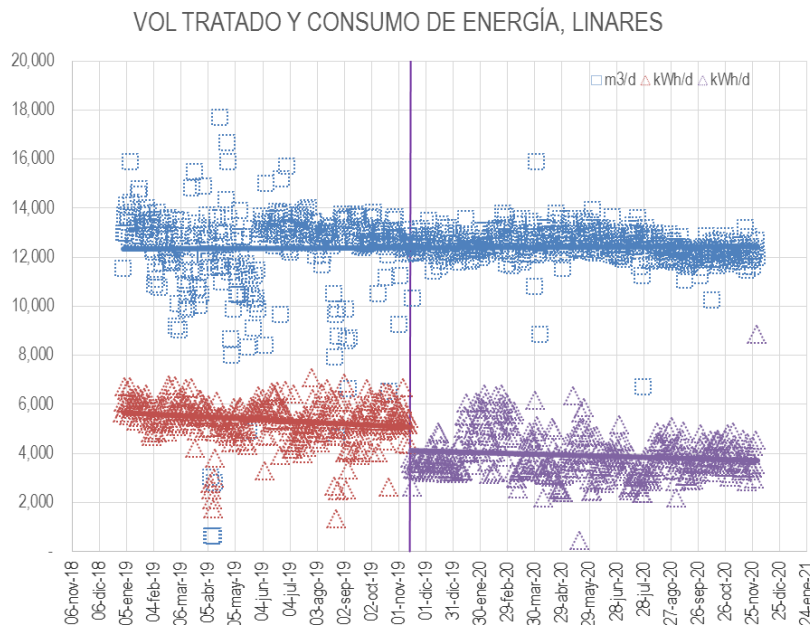


Figura 5. Consumo de energía en Planta Linares, antes y después del turbo-soplador. (Fuente propia SADM).

Lo anterior derivó en la decisión histórica para migrar a tecnologías más eficientes, al reemplazar sopladores del tipo centrífugo multi-etapa por turbo-sopladores de alta velocidad (tipo Air-Foil) en Dulces Nombres, Norte, Santa Rosa, Linares y Cadereyta 1; y cuyo costo de capital es muy importante, mismos que se espera instalar el año 2021, con lo que se pretende mejorar los índices de consumo energético, lo que va alineado con los objetivos estratégicos de la Institución.

#### Calidad Influyente AMM

La calidad del agua residual (ponderada AMM) presenta la siguiente tendencia (figura 5) en la que se

observa tendencia a la baja en DBO y SST, pero no así en la DQO, lo cual revela vocación de ciudad industrial, al incrementar la presencia de contaminantes orgánicos inertes (soluble y/o particulado) en el vertido al drenaje. Esta característica repercute en los indicadores y la producción de lodo.

Para el presente documento, se han considerado datos mensuales de 2019 y 2020, en virtud de que el turbo-soplador a prueba se instaló en Linares en diciembre de 2019, a fin de poder distinguir el comportamiento en el consumo de energía a partir de dicho evento; el índice relativo a población equivalente es anual.

*Datos obtenidos*

Se presentan para cada variable el valor promedio mensual con su correspondiente desviación estándar para fines estadísticos, ya que la concentración de contaminantes suele variar en forma errática. En la

tabla 1 se vacían los datos de registros operativos, como es el caso del volumen mensual tratado (m<sup>3</sup>/mes), concentraciones de DBO de influente y efluente, así como los kWh consumidos promedio mensual.

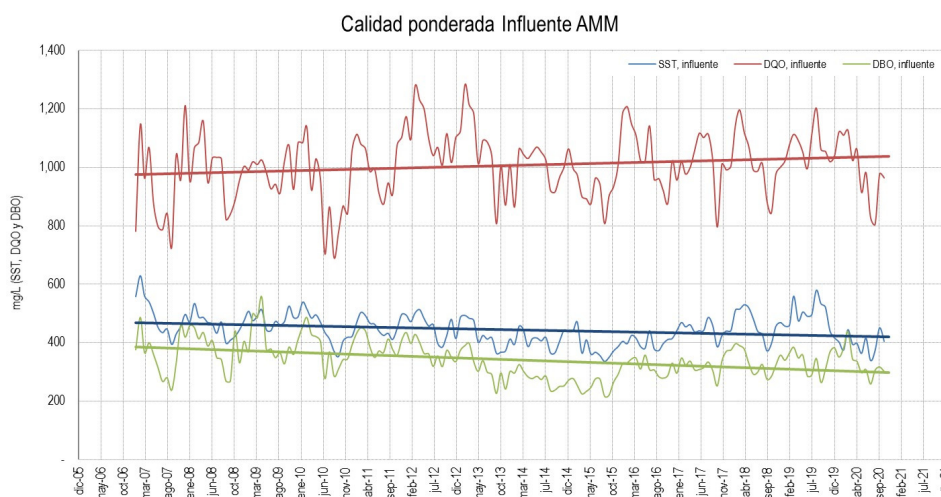


Figura 5. Calidad influente ponderada en AMM (Fuente Reporte interno SADM).

Tabla 1.- Datos Operativos de 2019 y 2020

Planta	Vol tratado, m <sup>3</sup> /mes		DBO, influente		DBO, efluente		kWh/mes	
	Mensual	Desv Std	Mensual	Desv Std	Mensual	Desv Std	Mensual	Desv Std
AMM	28,519,359	1,333,121	334.32	42.37	8.93	1.72	7,369,849	322,404
Dulces Nombres	18,173,336	969,537	332.03	51.46	9.49	2.73	4,287,215	285,814
Norte	6,672,056	418,779	412.88	43.50	8.03	2.78	2,211,121	122,135
Noreste	3,325,269	188,961	187.55	30.94	7.05	1.78	728,340	25,111
Santa Rosa	348,698	57,941	364.43	48.26	16.56	12.62	143,172	18,191
Linares	376,667	20,392	407.21	234.44	5.94	1.46	138,033	24,392

Mientras que en la tabla 2 se presentan los índices de la gestión operativa, como kWh por m<sup>3</sup> tratado, kWh por kg de DBO removida y de kWh/año respecto a la población equivalente, considerando 60 g DBO/d/PE. Esto nos indica que las plantas operan con sobrecarga de contaminantes, debido a la aportación de efluentes industriales en la red de drenaje, que repercute en su desempeño. También se ha observado importante diferencia de sólidos disueltos totales en el agua residual tratada respecto al agua potable, lo que supone descarga de rechazos de procesos de acondicionamiento de agua para la industria. Según datos de la tabla 2, la población total equivalente en AMM sería de 5,215,398 hab como promedio de

últimos dos años. Sin embargo, de acuerdo con las cifras de la encuesta intercensal de 2015, la población del AMM rondaba los 4,245,510 hab, con una distribución estimada en las cuencas de aportación de 2,290,317 (DN), 1,135,311 (N), 760,161 (NE) y 59,721 (SR). Es decir, la población equivalente sería 22.8% mayor; lo anterior pone en evidencia la condición de sobrecarga de contaminantes con la que operan las plantas de tratamiento, y aun así, ostentan buenos índices energéticos. Cabe mencionar que difícilmente se dispone de información relativa a consumo de energía en plantas similares en la República Mexicana, con suficiente detalle para ejercitar alguna comparativa.

Tabla 2.- Índices de Gestión de 2019 y 2020

Planta	kWh/m <sup>3</sup>		kWh/kg DBO		kWh/PE/año		Pob Equivalente	
	Mensual	Desv Std	Mensual	Desv Std	Anual	Desv Std	Anual	Desv Std
AMM	0.26	0.01	0.81	0.09	17.09	1.50	5,212,609	632,126
Dulces Nombres	0.24	0.01	0.75	0.10	16.37	2.20	3,297,486	493,968
Norte	0.33	0.02	0.83	0.08	16.68	1.37	1,503,537	135,039
Noreste	0.22	0.01	1.26	0.27	23.65	3.01	341,592	59,672
Santa Rosa	0.42	0.05	1.22	0.23	30.26	6.73	69,995	16,987
Linares	0.37	0.07	1.25	0.79	19.95	4.43	83,418	3,444

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los criterios de la figura 1, se observa (tabla 2) resultados más que excelentes, en todas las plantas, casi el 90% del agua residual que se trata en la Entidad ocupa menos energía que los señalados en el límite bajo de los criterios publicados en la red, lo que resume la eficacia de la gestión de los procesos de saneamiento.

Cabe mencionar que planta Noreste muestra un valor demasiado bajo (0.22 kWh/m<sup>3</sup>), lo cual puede deberse a que parte de la red de drenaje atraviesa zonas de nivel freático alto (ojo de agua La Cieneguita, entre otros), lo que provoca efecto de dilución, ya que la DBO influente está por debajo de 200 mg/L; otro caso es planta Santa Rosa, que estaría dentro del rango en lo que respecta a kWh/m<sup>3</sup> y kWh/PE/año, debido a que durante 2014 y 2015 tuvieron lugar libranzas por la implementación de un tercer reactor.

Respecto a planta Norte, se observa valores superiores para kWh/m<sup>3</sup> y kWh/kg DBO, lo cual se debe a que en su cuenca de aportación, está asentada gran parte de la industria tradicional, adicionalmente el flujo no ha crecido como estaba previsto, sin embargo, se mantiene acorde a la tabla de objetivos e indicadores, anteriormente mencionados. En los anexos se incluyen las gráficas del comportamiento de cada una de las plantas bajo estudio, con los criterios señalados en el presente documento.

#### Claves para lograr la eficiencia energética

A manera de observar el trasfondo de la búsqueda en el consumo eficiente de energía en los procesos de saneamiento, y a sabiendas que este es el insumo de mayor costo, se pueden distinguir tres factores, el capital humano, los procesos y la tecnología, como se mencionan en la figura 6.



Figura 6. Interrelación de factores para la eficiencia energética  
(Fuente: <https://fornieles.es/gestion-energetica/tres-factores-exito-plan-eficiencia-energetica/>)

- SADM tiene como su activo de mayor valor a su gobernanza (Consejo de Administración) aunado a su capital humano, que lo han ubicado como el organismo operador más eficaz de agua y saneamiento en la República Mexicana, y por qué no decirlo, fuera de nuestras fronteras.
- En el ámbito de saneamiento, el 100% del agua residual generada en el área metropolitana de Monterrey se descarga a cuerpos receptores y/o usuarios ART en cabal cumplimiento con la normatividad, lo que revela eficacia de los procesos de saneamiento (lodos activados con aeración a base de difusores de fondo de burbuja fina y sopladores del tipo centrífugo, actualmente). Habrá que añadir como parte de los procesos al Control de Descargas, que monitorea los efluentes industriales descargados al sistema de drenaje de la ciudad.
- El componente tecnológico se da en la implementación de los reactores biológicos, con diseño de mezcla completa y construidos en forma de flujo tipo pistón y con aeración

escalonada, con mayor densidad al inicio del reactor. Así mismo, destaca la próxima migración de la tecnología de turbo-sopladores en las principales plantas de tratamiento.

Considerando los anteriores factores, será posible mantener el récord de los indicadores en la inteligencia de los efectos del cambio climático provocada por gases de efecto invernadero que se alimentan de mayor uso de combustibles para producir más energía.

#### *Benchmarking con plantas de otras latitudes*

Se investigó en páginas de internet índices energéticos, como ejemplo, en la Unión Americana el consumo promedio oscila alrededor de 0.52 kWh/m<sup>3</sup>, en contraste, los países asiáticos muestran (0.31 kWh/m<sup>3</sup> en China, 0.304 en Japón y 0.243 en Corea; mientras que, en países europeos, el consumo de energía es alrededor de 0.42 kWh/m<sup>3</sup>. Un factor que influye en lo anterior son las transformaciones del nitrógeno, cuyo tema puede ser motivo de otro tipo de análisis.

Tabla 3. Comparativa con otras plantas de tratamiento

	Q, L/s	PE	L/hab/d	DBO Influyente	DBO Efluente	kWh/m <sup>3</sup>	kWh/kg DBO	kWh/PE/ año
Dulces Nombres	6,906	3,297,486	180.94	332.03	9.49	0.24	0.75	15.60
Killarney WWTP, Irlanda	120	54,000	192.00	300.00	5.00	0.25	0.82	17.52
Norte	2,534	1,503,537	145.63	412.88	8.03	0.33	0.83	17.65
Santa Rosa	133	69,995	163.68	364.43	16.56	0.42	1.22	24.84
Linares	143	83,418	148.24	407.21	5.94	0.37	1.25	19.89
Noreste	1,264	341,592	319.67	187.55	7.05	0.22	1.26	25.62
Bergen WWTP (NY)	1,320	350,000	325.85	200.00	20.00	0.74	1.32	88.01
Kipevu, Mombasa Kenia	198	196,000	87.24	560.23	5.00	0.90	1.60	28.58
Bratislava, Slovak WWTP	1,400	360,000	336.00	300.00	10.00	0.49	1.92	59.48
AC WWTP Canadian	1,654	367,000	389.39	193.00	8.00	0.41	2.20	57.81
AB WWTP Canadian	1,362	345,000	341.09	220.00	1.50	0.55	2.50	67.92
Himmerfjärdsverket, Sweden	1,300	350,000	320.91	250.00	15.00	0.27	2.50	32.18
Pensilvania AS-WWTP's	220	360,000	52.80	250.00	20.00	0.42	2.64	8.09
AE WWTP Canadian	3,773	860,000	379.05	198.00	6.40	0.52	2.72	72.11
AD WWTP Canadian	2,593	457,000	490.23	153.00	29.90	0.59	4.77	105.00

Una vez analizada la información se vació en una tabla comparativa (tabla 3), con base a kWh/kg DBO, pudiendo ver que en plantas de tamaño similar ostentan índices que facialmente duplican los que tiene la Coordinación de Saneamiento, lo que las ubica en buena posición en un ejercicio de Benchmarking de primer nivel.

Cabe mencionar que el costo de energía eléctrica en las plantas bajo estudio, representa entre 20 y 40% del costo total de operación, ya que la gran mayoría de las plantas son de menor tamaño, y cuyo promedio ponderado está alrededor de 2 pesos/m<sup>3</sup>, lo que

magnifica el afán de seguimiento y benchmarking sobre este importante insumo.

#### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Las aguas residuales generadas en el área metropolitana de Monterrey, que representa casi el 90% del agua residual tratada en la Entidad, utilizan 0.26 kWh/m<sup>3</sup>, valor menor al rango de la figura 1 (0.4 kWh/m<sup>3</sup>), así mismo, para remover un kg de DBO se utiliza 0.81 kWh/kg DBO, que contrasta con el valor mínimo del rango (1.5 kWh/kg DBO), finalmente la energía anual utilizada respecto a la población

equivalente tiene un promedio de 17.09 kWh/PE/año, valor por debajo del rango de 20 kWh/PE/año. Lo que evidencia eficacia en la utilización de energía para el saneamiento.

Ante la posibilidad de entrar en vigencia las modificaciones a NOM-001-SEMARNAT-1996, en la que destaca reducción en el valor de nitrógeno total, se tendría mayor demanda de energía, lo que seguramente repercutirá en los indicadores, sin embargo, la Coordinación de Saneamiento ha procurado en la presente gestión, la reposición de sopladores del tipo centrífugo multi-etapa por la moderna tecnología de turbo-sopladores de alta

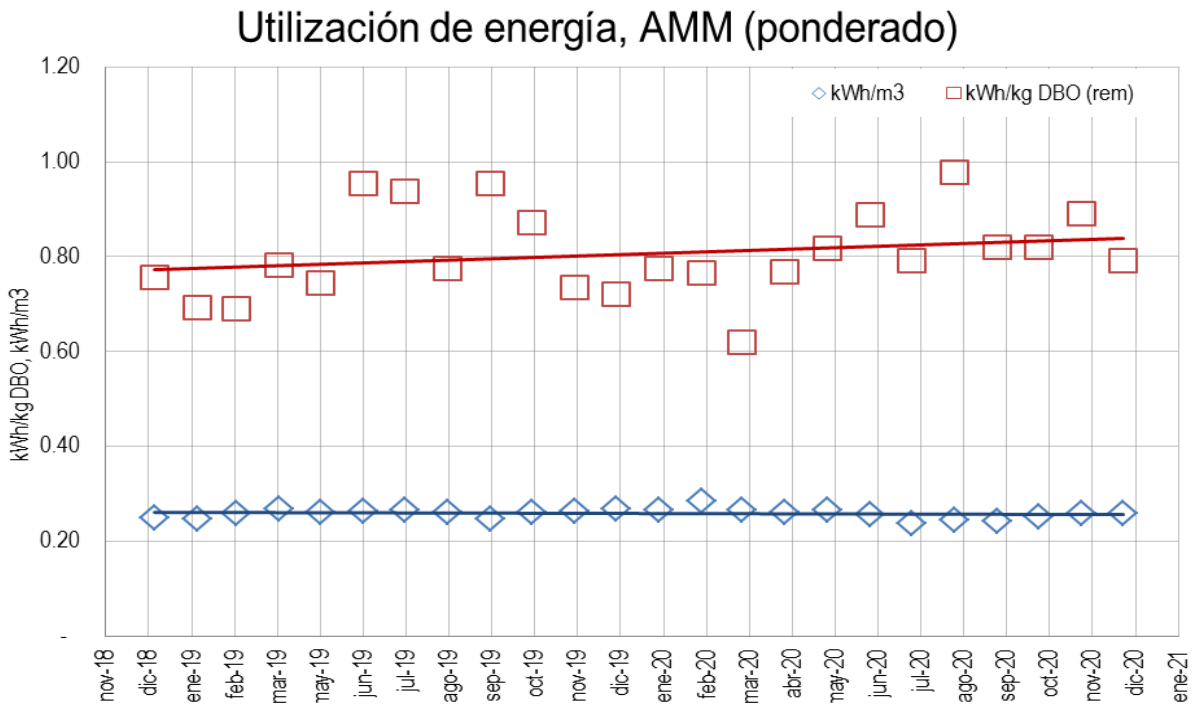
velocidad, que además de ser más eficientes, operan con variadores de frecuencia, lo que permitirá mantener el actual desempeño de las plantas, aún con los nuevos requerimientos de energía.

Otro dato a considerar es también la reciente renovación de difusores de fondo de burbuja fina en la totalidad de las plantas, lo que soporta la buena calidad del efluente tratado en las plantas de tratamiento. Por lo que será bueno tener seguimiento con el ejercicio del Benchmarking, a fin de mantener el buen desempeño en el consumo de energía eléctrica para el tratamiento de aguas residuales de SADM.

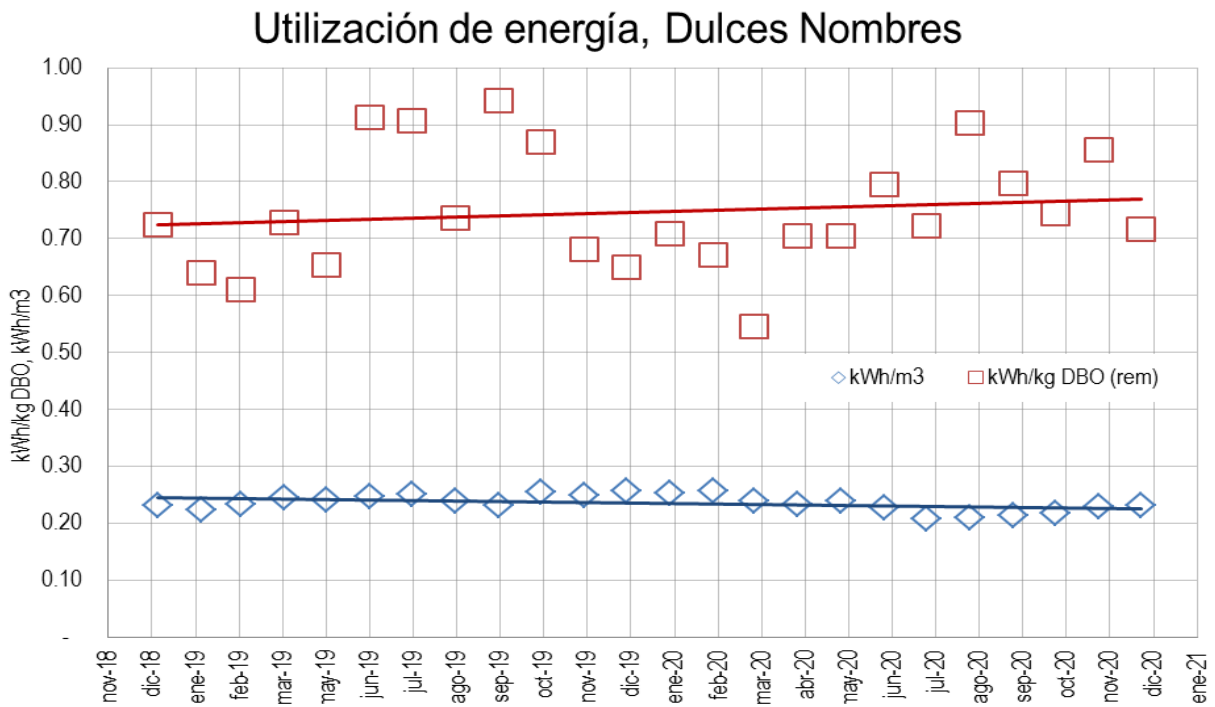
## REFERENCIAS

- Municipal Wastewater Treatment Plant Energy Evaluation for Town of Tonawanda WWTP, Agreement N° 7185, prepared for The New York State, Energy Research and Development Authority, Albany, NL, October 1985.
- Municipal Wastewater Treatment Plant, Energy Baseline Study, PG&E New Construction Energy Management Program, San Francisco, CA
- Electric Costs Survey, City of Newberg, OR WWTP, 1987
- Reportes mensuales de plantas AMM y foráneas operadas por SADM
- Andrea G. Capodaglio<sup>1</sup>, OrcID and Gustaf Olsson<sup>2</sup>, Energy Issues in Sustainable Urban Wastewater Management: Use, Demand Reduction and Recovery in the Urban Water Cycle. Department of Civil Engineering and Architecture, University of Pavia, 27100 Pavia, Italy (1), Department of Biomedical Engineering, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Box 117, 221 00 Lund, Sweden (2), <https://doi.org/10.3390/su12010266>
- Vanyo Jon C.E.M. (2018), “The Value of Benchmarking: Wastewater Treatment”, Minnesota Technical Assistance Program (MnTAP), University of Minnesota [https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2018/03/JonVanyo\\_TheValueofBenchmarkingWastewaterTreatmentFinal.pdf](https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2018/03/JonVanyo_TheValueofBenchmarkingWastewaterTreatmentFinal.pdf)
- [https://www.researchgate.net/publication/272209841\\_Leveraging\\_the\\_Energy\\_of\\_the\\_Group\\_to\\_Manage\\_the\\_Energy\\_of\\_the\\_Utility\\_The\\_NWWBI\\_Adopts\\_Industry\\_Tools\\_to\\_Improve\\_Energy\\_Performance](https://www.researchgate.net/publication/272209841_Leveraging_the_Energy_of_the_Group_to_Manage_the_Energy_of_the_Utility_The_NWWBI_Adopts_Industry_Tools_to_Improve_Energy_Performance)
- <https://docplayer.es/13690696-Las-lineas-base-de-intensidad-energetica-evaluacion-comparativa.html>
- <https://slideplayer.com/slide/3500964/>
- <https://www.slideshare.net/TippEnergy/optimising-energy-performance-of-water-supplies>

Anexo 1.

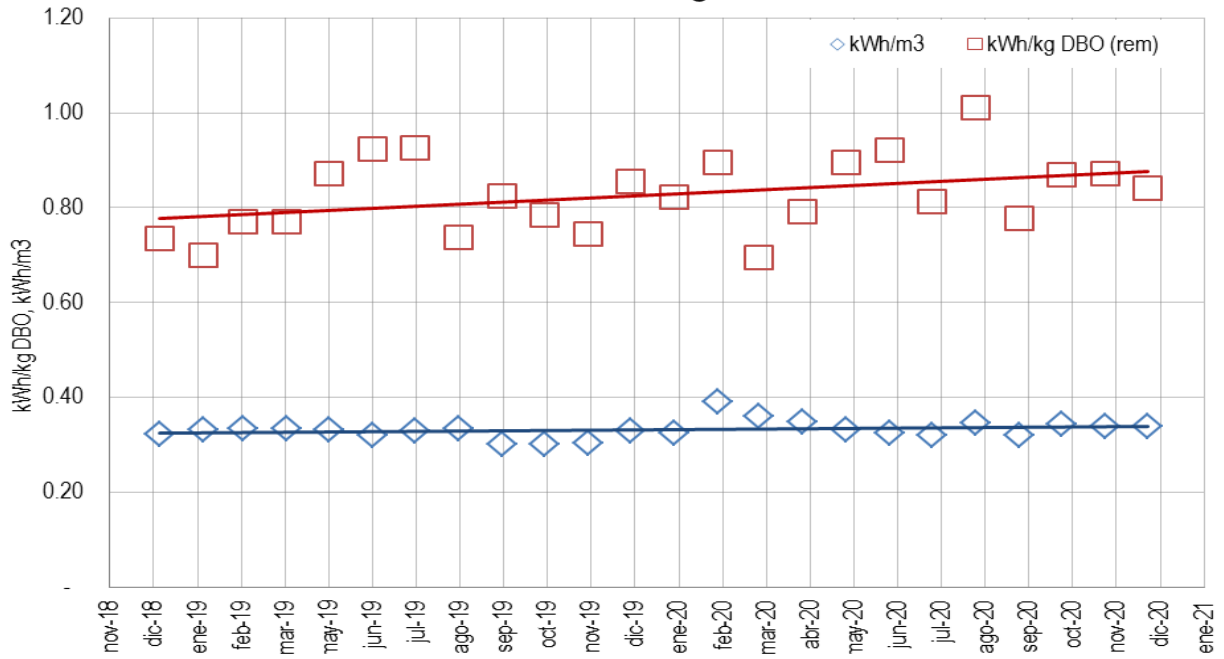


Anexo 2.



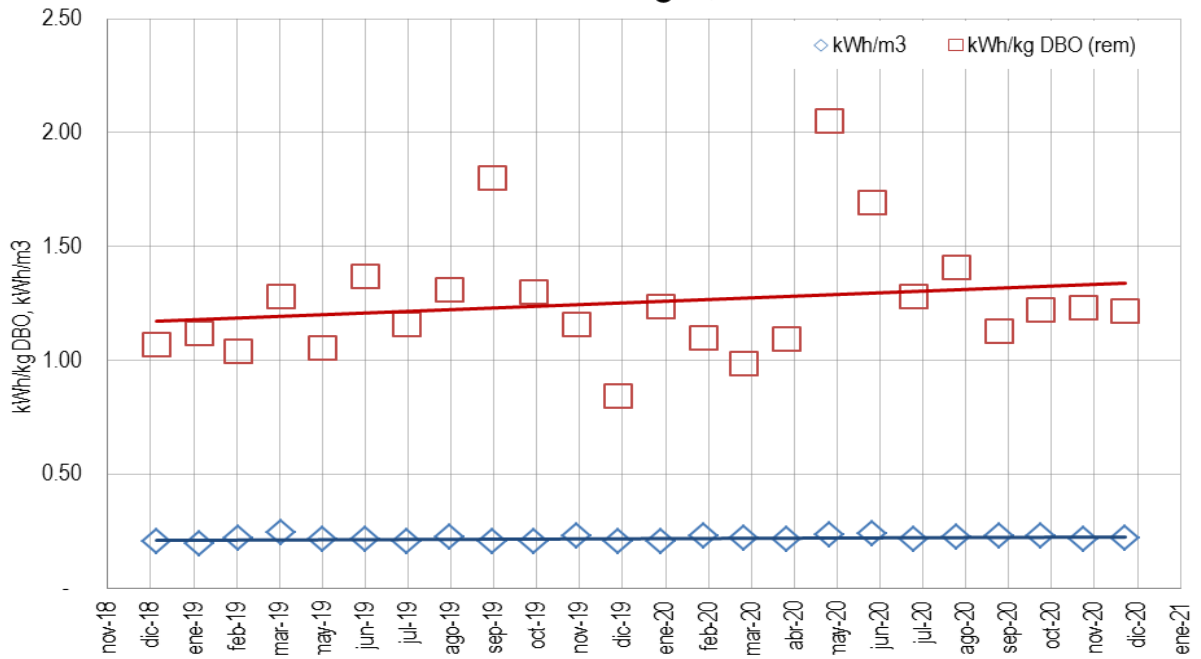
Anexo 3.

Utilización de energía, Norte

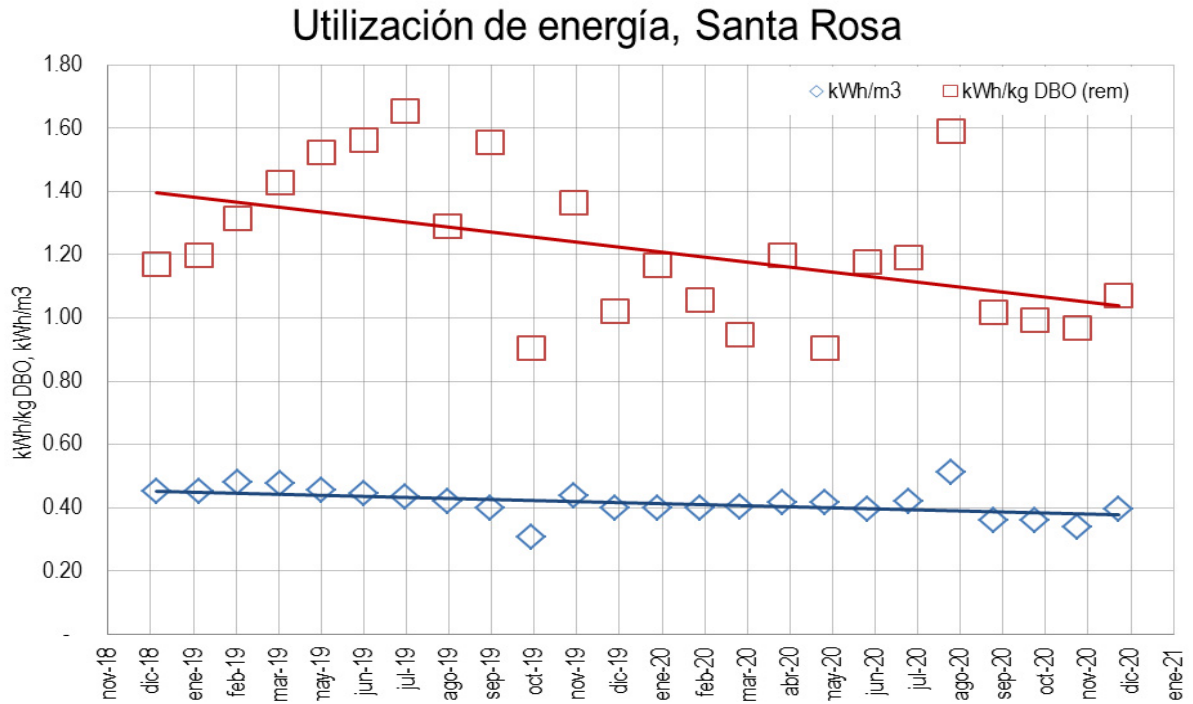


Anexo 4.

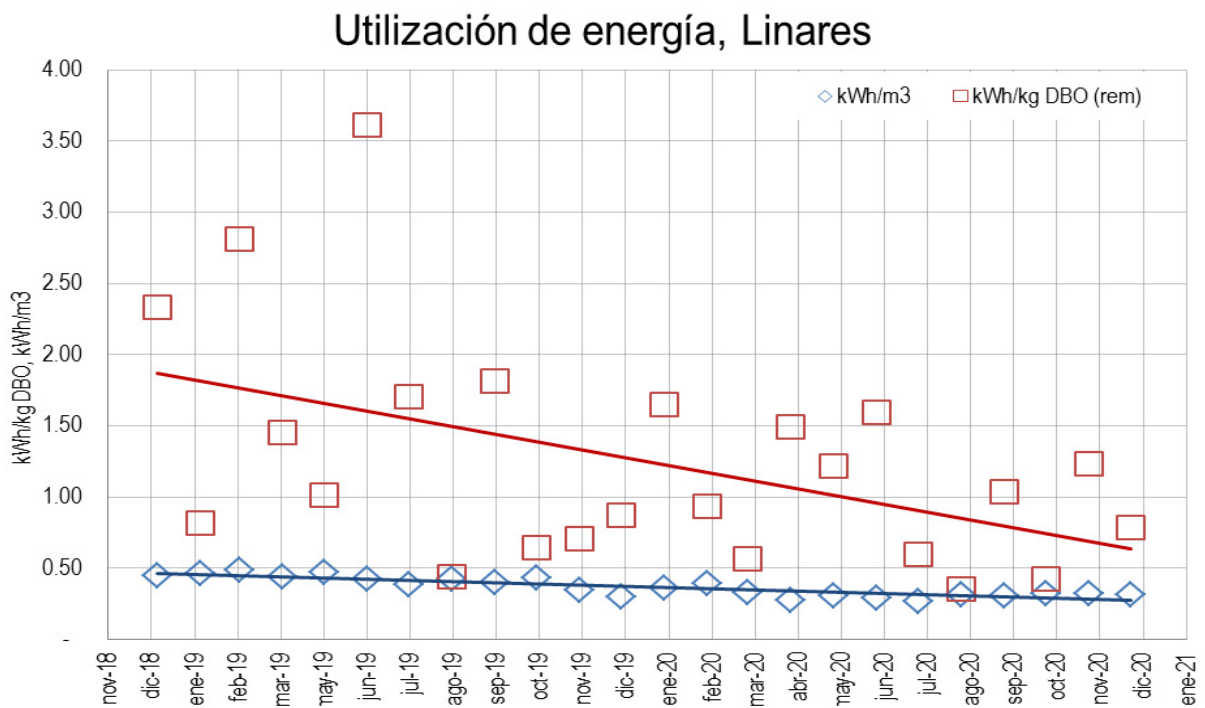
Utilización de energía, Noreste



Anexo 5.

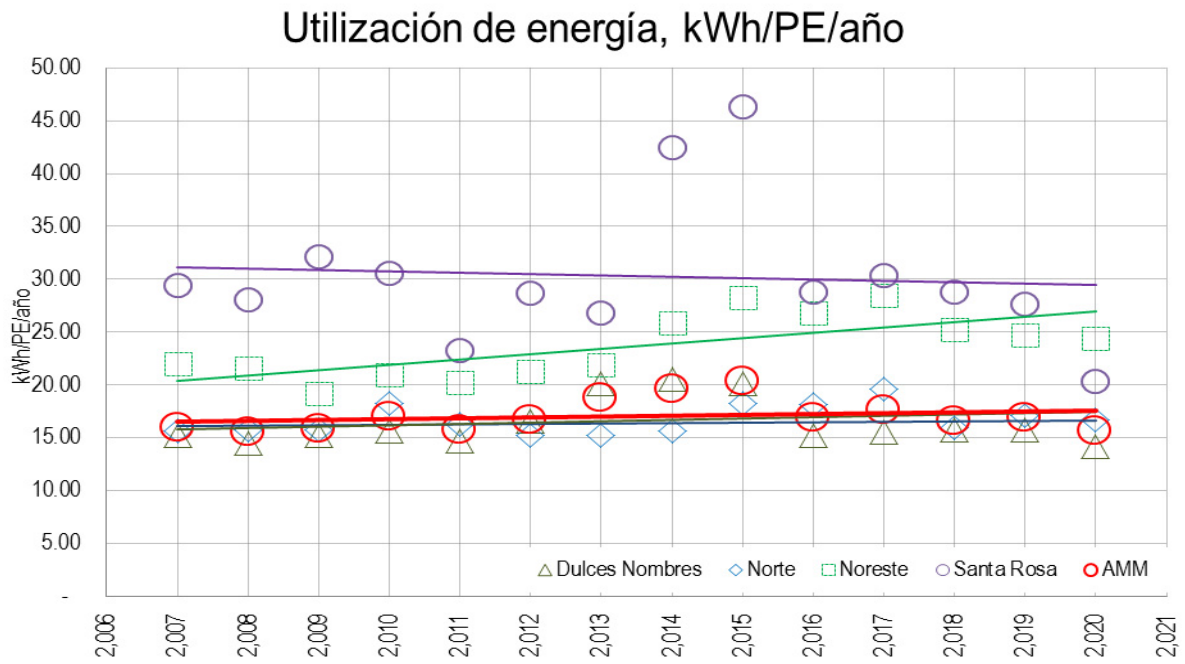


Anexo 6.





Anexo 7.



Como citar este artículo:

Vázquez A., et al. (2021). Consumo de energía en plantas de tratamiento-benchmarking. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 45-57. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-04



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

## Discriminación de precios en las tarifas de agua potable en la ciudad de Puebla

*Price discrimination in drinking water rates in the city of Puebla*



David Alberto Vargas Castro\*, Agustín López Romero,  
Delia del Consuelo Domínguez Cuanal, Lilia Varinia Catalina López Vargas

Recibido: 20/12/2020

Aceptado: 16/04/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El objetivo del artículo es demostrar como la estratificación de las tarifas de agua potable impacta directamente a los usuarios a través de la aplicación de discriminación de precios de tercer grado en los recibos para uso domiciliario. Esta estrategia de venta limita la accesibilidad y la asequibilidad del agua potable para los ciudadanos que viven por debajo de la línea del bienestar, provocando conflictos sociales entre la empresa concesionaria de los servicios y los usuarios afectados. Se analiza el municipio de Puebla, México tomando como referencia la influencia de los monopolios privados dentro de los servicios públicos y como ellos transmutan la esencia de las empresas públicas para la apropiación y operación de los servicios básicos de la vivienda, consolidando su poder en la zona de influencia. Se sitúa contextualmente en el territorio municipal (economía, población, producción, medio ambiente) visualizando el ingreso del ciudadano como una escala clientelar para ofertar el servicio a quien cuente con mejores oportunidades que el promedio. Estas acciones reflejan las intenciones enfocadas en maximizar las ganancias y no en buscar la equidad y la asequibilidad de los servicios del agua potable, y posiciona a sus habitantes en una situación de decisión para optar entre pagar el agua o destinar el gasto del hogar en otras necesidades básicas.

**Palabras clave:** Discriminación de precios, tarifas de agua, monopolio.

### Abstract

*The objective of the article is to demonstrate how the stratification of drinking water rates directly impacts users through the application of third-degree price discrimination on bills for household use. This sales strategy limits the accessibility and affordability of drinking water for citizens who live below the well-being line, causing social conflicts between the company that concedes the services and the affected users. The municipality of Puebla, Mexico is analyzed taking as a reference the influence of private monopolies within public services and how they transmute the essence of public companies for the appropriation and operation of basic housing services, such as water, consolidating its power in the area of influence; and it is situated contextually in the municipal territory (economy, population, production, environment) visualizing the income of the citizen as a clientele scale to offer the service to those who have better opportunities than the average. These actions reflect the intentions focused on maximizing profits and not on seeking equity and affordability of drinking water services and places its inhabitants in a decision situation to choose between paying for water or allocating household expenses elsewhere. basic needs.*

**Keywords:** Price discrimination, water tariffs, monopoly.

## 1. INTRODUCCIÓN

A partir del sexenio del ex presidente Miguel de la Madrid (1982-1988), los servicios públicos de agua se descentralizaron del gobierno federal con la extinción de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), los cambios en la política hídrica mutaron de una acción periférica coordinada por el gobierno federal hasta una nuclear, enfocada en los municipios con los ayuntamientos como figura legal dentro de la gestión del agua. La urgencia del suministro en las ciudades y comunidades, ligada a la falta de infraestructura y el crecimiento demográfico indujo a que la gestión se enfocara en el aspecto técnico operacional, y se dejara atrás las cuestiones legales, sociales, antropológicas, ambientales y culturales del agua, mismas que comprenden a la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH por sus siglas en inglés) la cual, ha sido definida por la Asociación Mundial del Agua como un proceso que pretende desarrollar y gestionar de forma coordinada el agua, la tierra y los recursos conexos, tratando de maximizar el bienestar social y económico, de una manera equitativa y sin comprometer el nivel de sostenibilidad de los ecosistemas.” (UN-Water, 2015)

Paulatinamente este proceso de descentralización aparejado a la limitada acción de los ayuntamientos generó grietas y baches en el camino de la administración pública del agua, dejando nichos de oportunidad para aquellos que visualizaban fallas en los procesos de distribución, conducción, saneamiento, obras hidráulicas y otras faltantes para la gestión del agua. A medida que la población fue creciendo se apreciaba cada vez más que a menor disponibilidad menor oferta y mayor demanda. Además de ello, al finalizar la década de los ochenta la población en México llegó a 82.37 millones de habitantes, siendo que en 1980 la población fue de 67.76 millones de habitantes, 14.61 millones de mexicanos en una década (Banco Mundial, 2020), el crecimiento poblacional tuvo un auge y cada año la demanda por bienes de consumo crece a niveles nunca visto, todos ellos esgrimiendo como insumo básico el agua, además de ello la informalidad y los mercados negros de agua, fomentan aún más la cultura extractivista ante el recurso. Un mercado negro de agua es cuando se adquiere y se comercializa el recurso de forma ilegal, ya sea por medio de pozos clandestinos, de agua robada por medio de pipas o de otras locaciones para revenderla en lugares donde prevalece la escasez (Russell, 2019), (Calatrava-Leyva & Garrido-Colmenero,

2001). La importancia que amerita el agua para el desarrollo de México propone una idea de uso y pago por el derecho del abastecimiento, por lo que el mercado que se creó propició la competencia entre usuarios implantando un imaginario falso de potestad para usar, prodigar y contaminar el agua sobre el “supuesto” del derecho de pago impulsado por mecanismos para obtener el servicio de un único gestor autorizado (LAN, 1992). La declaración del servicio público de agua determina para los usuarios la condición de recepción y uso obligatorio del servicio, esto significa obligatoriedad de usar y pagar por el equipamiento (Secretaría de Gobernación, 2012).

La consecuencia de esta exclusividad es la ilegalidad de cualquier suministro que un usuario contrate o reciba de un operador distinto del autorizado para no caer en un delito, por lo que las irrupciones del mercado y sus externalidades fomentaron la apropiación de los recursos hídricos. Al crecer el mercado se requiere de nuevos proveedores de servicios ya que las autoridades y gobiernos locales no cuentan con capacidad productiva para satisfacer la demanda, por lo que la promoción de la participación privada se postra como un ente salvador de la ineficiencia productiva (Martín & Justo, 2015).

La participación privada cuenta con muchas ventajas (CNA, 2010, pág. 7) su flexibilidad y adaptación al cambio es una de sus principales bondades ante los cambios de gobierno y de política, y en muchos casos se trata de agentes económicos que promueven los promotores de una correcta distribución y eficiencia, lo preocupante es cuando su participación llega más allá, hacia la conducción de la política hídrica y en el acaparamiento del mercado del agua.

Desde otra perspectiva la participación privada no debería tener participación en los servicios públicos de agua. De acuerdo con Jouravlev (2001) en muchos casos, las privatizaciones se presentan como la panacea que permitirá resolver los problemas de ineficiencia de las empresas estatales de agua potable y realizar las inversiones indispensables para satisfacer las necesidades de la comunidad. Sin embargo, los servicios de agua potable y alcantarillado son un ejemplo clásico de monopolio natural local. El Monopolio Natural, es aquel donde solo existe una empresa que vende un solo bien y controla el mercado sin ayuda ni influencia legal (Accinelli & Tenorio, 2012). Puede decirse que se trata del servicio público más monopólico y, como

tal, exhibe una resistencia excepcional a casi todas las formas de competencia. La competencia directa de mercado en los servicios de agua potable y alcantarillado en una región determinada extrañaría una superposición ineficaz y antieconómica de redes de agua y de alcantarillado, cuyo costo sería prohibitivo, llevando a la bancarrota a las empresas rivales y a la consolidación del monopolio privado.

La forma monopólica del agua, generada a partir de la participación privada, por definición conduce al único resultado, que solo quede una empresa que sea la que controle la totalidad de la demanda. Cuando se trata de bienes y servicios de consumo general, los monopolios buscan acaparar no solo los canales de venta, sino toda la cadena productiva, en el caso del agua, el control de toda la cadena productiva se podría definir como el acaparamiento de las fuentes de abastecimiento superficiales y subterráneas, las zonas de recarga natural, la infraestructura, y los canales de venta y el precio por sobre todo lo demás y solamente lograrán pagar el servicio de agua a aquellos que tienen la capacidad de pago de acuerdo a las tarifas establecidas.

Un ejemplo a nivel mundial sobre la influencia del poder sobre la privatización es el caso de Cochabamba en Bolivia. A mediados de la década de los ochenta Bolivia sufrió un cambio estructural en sus políticas económicas, sociales y políticas para fomentar la economía de mercado y de competencia, acompañado con la aplicación de una democracia liberal representativa dentro del país con el fin de salir del yugo de la deuda externa (Banco Mundial, 2020). Geográficamente Bolivia (1,098,580 km<sup>2</sup>) tiene mayor extensión territorial que Francia (54,9087 km<sup>2</sup>), Alemania (357,580 km<sup>2</sup>), Austria (83,879 km<sup>2</sup>), Suiza (41,290 km<sup>2</sup>) y Bélgica (30,530 km<sup>2</sup>) (Banco Mundial, 2018) juntas y gracias a su localización en la cordillera de los Andes cuenta con una gran disponibilidad de recursos naturales principalmente plata, estaño, gas y madera, su población a inicios del siglo XXI no superaba a la de París (Población de Bolivia en el año 2000: 8,418,264 hab. Población de París en el año 1999: 2,125,250) y un ingreso promedio de \$980 US al año (Banco Mundial, 2000). Una economía estancada en la extracción de materias primas limitaba su desarrollo productivo por lo que era muy fácil caer en periodos de recesión económica al ser vulnerables a los precios internacionales, booms e influjos de capital repetidos, además de que la extracción se encontraba dividida por regiones de familias políticas que en afán de control económico competían de

forma desleal dentro del mismo territorio Bolivariano (Banco Mundial, 2006). Además de la problemática productiva, la mitad de la población se dedicaba al sector informal con una baja productividad, expropiaron capitales extranjeros dedicados a la extracción de petróleo y al mismo tiempo los flujos de ayuda extranjera no se veían reflejados en el desarrollo social y económico del país. Estas problemáticas los llevaron a que su deuda externa aumentara significativamente, debido al desplome del mercado del estaño a nivel mundial en 1980. En el periodo de 1983 a 1985 la crisis llegó a su punto máximo con periodos de hiperinflación y una caída del 5% del Producto Interno Bruto (PIB) real per cápita (Banco Mundial, 2006).

A causa de las obligaciones internacionales con el Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional, se apoyó técnica y económicamente las reformas estructurales de su sistema productivo, uno de ellos fue la reorganización del sector de agua potable, alcantarillado sanitario orientado en la privatización de las principales empresas municipales de agua con los principios de Full Cost Recovery que significa: asegurar la financiación de todos los costos involucrados en la ejecución de un proyecto y solicitar financiación para los costos directos del proyecto y para una parte proporcional de los gastos generales de su organización (Massarutto, 2007) aplicable en la fijación de las tarifas, competencia en el uso y acceso a los recursos hídricos y el fortalecimiento de las empresas municipales con inversión privada; así como la creación de una autoridad regulatoria (Flores C. , 2000).

La zona donde se gestó el conflicto por el agua fue el Valle de Cochabamba donde vivían alrededor de 700 mil personas la cual está considerada como una zona semiseca, con baja disponibilidad de agua, su cobertura de agua potable en la ciudad de Cochabamba solo llegaba al 50%, y un 35% se abastecía por medio de cooperativas, asociaciones y comités de agua y el 15% se abastecía por medio de tanques cisterna. La conjunción de la problemática macroeconómica y las características ambientales de la región, propiciaron la inconformidad de la población y la aversión hacia modificar la relación cultura que tenían los habitantes en torno al agua, por lo que al aplicar el paquete de medidas estructurales sobre los habitantes de Cochabamba junto con el choque de visiones sobre la concepción del agua ocasionaron enfrentamientos violentos entre la población y el gobierno de la ciudad como lo remarca

Flores (2000), las causas directas del conflicto fueron dos:

1. La concesión, en forma poco clara, de la empresa municipal de distribución de agua (SEMAPA) a un consorcio privado internacional, denominado «Aguas del Tunari», incluyendo la implementación del proyecto Misticuni.
2. La aprobación en el parlamento, de manera no consensuada, de la Ley de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario en octubre de 1999, siguiendo recomendaciones del BM: en junio de 1999 un informe reservado de este organismo sugiere las concesiones privadas, destaca el rol de las superintendencias como organismos de regulación, y propone la no subvención en los servicios básicos (Banco Mundial, 1999 P.144).

En noviembre de 1999 se organiza el primer bloqueo de campesinos y regantes y al mismo tiempo se crea una organización civil regional en defensa del agua la *Coordinadora Departamental del Agua y la Vida*, con la intención de defender el derecho al agua de la población. Después de varios enfrentamientos y heridos, el gobierno reconoce a la Coordinadora como actor de conflicto y se convierte en el vínculo para las negociaciones para modificar la ley y el contrato de concesión. Por lo que el 10 de abril del 2000 después de múltiples batallas entre la policía, el ejército y la población, con un saldo de: un muerto, más de 100 heridos y 50 mil personas tomando la plaza de armas; el gobierno cede a las demandas ciudadanas; la empresa *Aguas del Tunari* con capital establecido en las Islas Caimán salga del país y su contrato sea rescindido, con una indemnización y el desconocimiento de la deuda generada por la privatización por el gobierno de Cochabamba. Después de quince años la defensa del agua no ha terminado en Cochabamba, aún existen movilizaciones por el derecho al agua y para garantizar el servicio a quien no lo tiene, el conflicto ha cambiado la concepción del Bolivariano y ha abierto el abanico a defender no solo el sistema municipal, sino las fuentes de abastecimiento, de recarga y de descarga. La guerra del agua en Cochabamba, es un ejemplo a nivel mundial de la lucha social en contra de las políticas neoliberales aplicadas a los servicios básicos para la población.

## 2. CLASIFICACIÓN DE LA DEMANDA DEL AGUA. PERSPECTIVAS ASOCIADAS A LA ESCASEZ Y A LAS ACCIONES DE MONOPOLIO DE LOS SERVICIOS DE AGUA

Los monopolios en el servicio del agua para uso doméstico no tienen competidores dentro de su área de influencia, son los únicos facultados muchas veces por la ley y los gobiernos locales, para otorgar el servicio a la población. Los monopolios legales son las empresas pertenecientes al Estado o a los gobiernos locales, las cuales tienen el objetivo de intervenir en el mercado para poder controlar los precios y la oferta y así sea posible garantizar la accesibilidad del bien a la población; a diferencia de las empresas privadas, estas empresas no perciben incrementar su capital a través de la ganancia. En el tema del agua, los monopolios legales son los Organismos Operadores de Agua (OO's) y como toda empresa tienen capital propio y cuentan con capacidades de ofertar y vender los servicios de agua a la población. Cuando se traspasa esta figura monopólica a un ente privado ocurre una transformación del fin último de la empresa, ahora busca incrementar el capital al incrementar la ganancia, con la ventaja de que ya está consolidada en el mercado, es decir, es la única que ofrece dicho servicio en una región. A pesar de que pueda existir competitividad, de forma estricta la competencia se vuelve cero al ser los únicos por la ley autorizados para otorgar el servicio y los competidores como los piperos, las tomas clandestinas, los pozos clandestinos e incluso la captación de agua de lluvia son una disrupción dentro del mercado del agua, por lo que la tendencia es la desaparición de estos.

En México se le llama "Pipero" a aquel que desempeña el oficio de transportar y dotar de agua por medio de un tanque cisterna. En 2013 decenas de piperos, adheridos a la asociación Transportistas Unidos del Valle de la Malintzi y otras siete agrupaciones, se manifestaron en la explanada del estadio Cuauhtémoc en contra de la nueva Ley de Agua del Estado, pues denunciaron que los está orillando a desaparecer, al prohibirles la prestación del servicio en 90 por ciento de la zona conurbada de Puebla, la criminalización de la venta del líquido, con multas de hasta 92 mil pesos, y el aumento desmedido de requisitos para la liberación de permisos (Llaven, 2013).

Al incorporar la variable de la competencia dentro del análisis, se debe de mencionar la oferta disponible en la región de estudio y describir la situación de la

capacidad de la carga del acuífero de la Ciudad de Puebla conforme a los estudios oficiales, los cuales son la guía para otorgar las concesiones y permisos de explotación. Como marco de referencia se toma en el *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle de Puebla, clave*

*2104, en el Estado de Puebla, Región Hidrológico-Administrativa Balsas*, publicado por la Comisión Nacional del Agua en 2016, actualización 2018; en el que se describe de forma asertiva la situación de la disponibilidad y de las actividades económicas en la zona del acuífero.

Tabla 1. Principales localidades ubicadas en la superficie del acuífero del Valle de Puebla, clave 2104, en el Estado de Puebla, Región Hidrológico-Administrativa Balsas

Heroica Puebla de Zaragoza	Santa Ana Xalmimilulco
Cholula de Rivadavia	San Rafael Tlanalapan
San Martín Texmelucan de Labastida	San Miguel Canoa
San Bernardino Tlaxcalancingo	Santa María Coronango
San Andrés Cholula	Santa María Xonacatepec
Sanctorum	San Lorenzo Almecatla
Santa María Moyotzingo	Santa María Zacatepec
Huejotzingo	San Francisco Ocotlán
San Juan Cuautlancingo	San Buenaventura Nealtican
Santiago Momoxpan	San Miguel Xoxtla
San Matías Tlalancaleca	

Fuente: (DOF, 2016)

Siendo la localidad Heroica Puebla de Zaragoza, la que engloba al 65.1 por ciento de la población total urbana del Estado de Puebla. De acuerdo con las proyecciones realizadas por el Acuerdo para el año 2030 la población urbana llegará a 2,616,048 habitantes, 414,341 habitantes más de los que había en el año 2010, mientras que la población total pasará de 2,301,261 habitantes en 2010 a 2,711,369

habitantes al final del año 2030. Se espera que a finales del 2030 la población dentro de la demarcación del acuífero requerirá 245.16 millones de metros cúbicos por año solo para abastecimiento de agua potable, lo cual representa 30.26 millones de metros cúbicos más de los utilizados en el año 2013 (DOF, 2016).

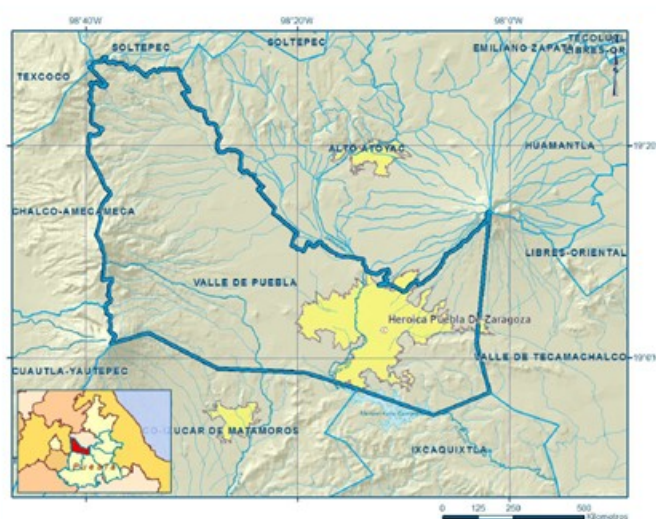


Figura 1. Localización del Acuífero del Valle de Puebla.  
Fuente: (DOF, 2016)

Debido a la geografía de la ciudad y sus estratos subterráneos el abastecimiento del agua está comprometido a causa de la creciente demanda de la población. Las principales actividades socioeconómicas en los municipios que integran al acuífero Valle de Puebla, clave 2104, son las relacionadas con el sector terciario, las cuales generan el 67 % del Producto Interno Bruto (PIB) generado dentro de los límites administrativos del acuífero, en segundo lugar se encuentran las actividades englobadas en el sector secundario, las cuales generan el 32 % del PIB de esta región, y en tercer lugar se encuentran las actividades pertenecientes al sector primario, representadas por la agricultura y la ganadería dentro de la zona de estudio, las cuales aportan el 1 % de esta zona. Es el uso público urbano la actividad que demanda más

agua en la región, con el 61.8% del volumen anual total extraído del acuífero; seguido por el uso agrícola con el 23.6 %; siendo los principales cultivos sembrados maíz, grano, alfalfa verde, avena forrajera, haba verde, calabacita y coliflor. La disponibilidad media anual en el acuífero Valle de Puebla, clave 2104, se determinó considerando una recarga media anual de 360.7 millones de metros cúbicos anuales; una descarga natural comprometida de 61.2 millones de metros cúbicos anuales y un volumen concesionado e inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua (RPDA) al 30 de junio de 2014 de 254.85 millones de metros cúbicos anuales, resultando una disponibilidad de 44.64 millones de metros cúbicos anuales (DOF, 2016).

Tabla 2. Disponibilidad media anual de agua subterránea

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
2104	VALLE DE PUEBLA	360.7	61.2	254.852726	327.7	44.647274	0.000000

Fuente: Elaboración propia en base a DOF (2016)

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida;  
VCAS: volumen concesionado de agua subterránea;  
VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos;  
DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea.

El resultado de la tabla 2 indica que existe volumen disponible para otorgar concesiones o asignaciones, en el acuífero Valle de Puebla, clave 2104, en el 2016 y actualizado en el 2018. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000. El máximo volumen que puede extraerse del acuífero para mantenerlo en equilibrio es de 299.5 millones de metros cúbicos anuales, que corresponde al volumen de recarga media anual que recibe el acuífero, menos la descarga natural comprometida. Para controlar el riesgo de sobreexplotación se manejan los instrumentos jurídicos aplicables para controlar la extracción, y se previene que el acuífero de Valle de Puebla ya presenta un abatimiento del nivel de agua subterránea, por lo que existe el riesgo de que un incremento de la demanda empeore los efectos perjudiciales causados por la sobreexplotación, tales como la profundización de los niveles de extracción, la inutilización de pozos, el incremento de los costos de bombeo, la disminución e incluso desaparición de los manantiales y del caudal base, así como el deterioro de la calidad del agua subterránea, por lo que es necesario prevenir la sobreexplotación para proteger al acuífero de un desequilibrio hídrico y deterioro ambiental que pudiera llegar a afectar las

actividades socioeconómicas que dependen del agua subterránea en esta región (DOF, 2016).

Además de las características subterráneas, la preocupación por la inminente escasez de agua en la Ciudad de Puebla tiene características sociales que impactan a la población y se busca demostrar los efectos sociales de la sobreexplotación del acuífero y de la preocupación por la probable escasez. Investigaciones como (Toxqui Furlong, 2013; López Zamora, 2014; Mejía Sánchez, 2016; Vargas Castro, 2017; Rojas & Fernández Lomelín, 2019) y otras; remarcan la importante relación entre el territorio, el agua y el sentir social, el cómo la población percibe el agua en su vida diaria y como en todas las investigaciones, existen actores que afectan la dinámica social irrumpiendo y creando conflictos al no encontrar un punto de consenso entre las partes. La relatoría del poder y el agua se extiende más allá del análisis estratégico para el desarrollo de las sociedades, está ligado a un mecanismo de control sobre la vida de las personas y hacia su la forma de lo que cada uno entiende por desarrollo (Foucault, 1988).

La llamada "privatización del agua en Puebla" se dio luego de un proceso de licitación y asignación de la concesión del servicio del agua durante 30 años, dirigido e implantado por el gobierno del finado

Rafael Moreno Valle, ejecutado por la LIX Legislatura del Congreso local y reconocido por el gobierno municipal de José Antonio Gali Fayad el cual declaró el argumento clave para lograr la modificación de la Ley de Agua, que fue declarar al SOAPAP insolvente y en quiebra, lo que permitiría la entrada de capital privado para su operación (Garduño, 2016). Exactamente al terminar el año 2012, se aprobó la nueva Ley del Agua del Estado de Puebla, donde resaltaban 6 reformas estructurales, la última afinada el 19 de octubre de 2015, que incorporan la entrada a la participación privada en la gestión de los organismos operadores, siempre y cuando los municipios se declaren incapaces de ofertar el servicio.

La falta de transparencia y la opacidad en el proceso ocasiona malas interpretaciones sobre el proceso de asignación de la concesión, dando pie a divisarlo como un proceso privatorio de la participación pública, por lo que conceptualmente se trasmuta en un proceso de privatización del servicio. Aunque discreto, la forma de este proceso constriñe la participación de la ciudadanía y violenta la democracia, y aún más, el contrato de concesión otorgó los activos fijos del Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP) junto con el sector jurídico que opera en favor de la empresa concesionaria. Este acto es una transferencia de valor hacia el nuevo “dueño”, pero estos activos se provienen del sector público. De acuerdo al párrafo III del Artículo 115 Constitucional, *es obligación de los municipios otorgar el servicio de: Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de las aguas residuales*, por lo que la participación privada choca con el alcance que tiene dentro de la concesión y tomando a la Constitución como Ley Suprema en la República Mexicana, ninguna otra ley puede desmeritar sus acciones. Para ello, la figura gubernamental el SOAPAP fue minimizada a ser un ente observador y consultor para cumplir con el artículo 115 y difuminar el suceso anticonstitucional por el que se podría perder la concesión, junto con los beneficios de aún contar con una cara pública con la que se puede obtener recursos ante la federación.

Aquí es donde la paradoja se vuelve palpable, el monopolio se torna monopólico cuando sus acciones están dirigidas a consolidar su poder de forma totalitaria en el mercado. Anteriormente y de acuerdo al Artículo 75 y 76 de la Ley de Agua y Saneamiento de Puebla (1992) se establecía que la fijación de las tarifas estaría en función de los gastos de operación administración, mantenimiento, amortización de

créditos y la constitución de un fondo de reserva para la rehabilitación, ampliación y mejoramiento de los sistemas, la depreciación de activos fijos y los demás gastos que correspondan al costo real de la prestación del servicio con previa autorización de los estudios (LASEP, 1992, pág. Art. 75). La fijación de tarifas de forma indiscriminada a diferencia de lo anteriormente realizado en la Ley de Agua y Saneamiento de Puebla (1992), los cortes injustificados sin sustento jurídico, el doble cobro, conocido por generar cobros extras a usuarios con diferente nombre mismo predio o en su caso adeudos en predios sin contrato de agua son algunas de las prácticas que reclaman los usuarios ante la nueva gerencia y que atentan en contra del derecho humano al agua (ONU 2011, p.30). La empresa concesionaria justifica estas acciones en lo dicho en el Artículo 31 fracción IV, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos el cual establece que es obligación de los mexicanos contribuir a los gastos públicos, así sean de la Federación, como del Distrito Federal o del Estado y Municipio en que residan, de la manera proporcional y equitativa que dispongan las leyes; sin embargo las ganancias no están siendo administradas por la cara gubernamental, sino por la misma concesionaria, por lo que aún así, están faltando al mismo artículo que se usa como justificación. La facultad de cortar el servicio de agua a los usuarios irrumpe al estado de derecho tratándose de que lo haga una sociedad mercantil por acciones; porque de acuerdo con el artículo 17 Constitucional nadie puede hacerse justicia por propia mano y; sin embargo, a esta concesionaria particular tal posibilidad le ha sido conferida en una ley (Porrás Rugerio, 2019).

El análisis en contra de las prácticas monopólicas en los servicios del agua va más allá que el tema del derecho y las leyes, la aplicación del poder y la violencia con la que se manifiesta, atañe a los principios básicos de la vida al restringir el acceso al agua para la población, por lo que el análisis presentado va más allá que solo la entrada de la participación privada a la prestación de los servicios, sino el cómo han ido evolucionando dichas acciones al momento de esta investigación.

### 3. EL MONOPOLIO DE LOS SERVICIOS DE AGUA EN LA CIUDAD DE PUEBLA

El argumento de que la privatización de los servicios de agua potable estatales, ineficientes y deficitarios, mejorará automáticamente su desempeño no es más que una tosca simplificación del tema, las acciones



que caracterizan al monopolio natural, pierden los incentivos a la eficiencia productiva y a la eficiencia en las asignaciones ya que dependen, fundamentalmente, del marco regulador elegido (Jouravlev, 2001) cimentado en estudios técnicos. Existen diversas propuestas sobre el cálculo de la demanda de agua de forma técnica, es decir consumo entre disponibilidad (CONAGUA, 2007), (Salazar Adams & Pineda Pablos, 2010), (Tzatchkov & Alcocer-Yamanaka, 2016), lo cual es válido e incluso vital para el diseño, el abastecimiento, la gestión y la planeación a corto y largo plazo; pero para este caso se busca un análisis económico conforme a la operación del monopolio que visualice los momentos

clave entre precio y dotación del servicio para compararlo con el nivel de ingreso que cuenta la población observada.

El análisis requirió el uso de las tarifas publicadas en la página del Sistema de Información de Tarifas de Agua Potable (SITAP) que tiene a cargo el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) con apoyo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el portal presenta información histórica sobre las tarifas del servicio de agua potable, alcantarillado y saneamiento de 82 ciudades de México, incluyendo todas las capitales de los estados desde 2006 hasta 2019.

Tabla 3. Tarifas del estrato bajo de agua potable para la Ciudad de Puebla del 2006 al 2018

Tarifas (\$/m3) Agua Potable. Uso Doméstico. Precios constantes.				
Año	Estrato Bajo	Estrato medio	Estrato Alto	Inflación Anual Acumulada
2006	4	4	4	4.05
2007	4.38	4.38	4.38	3.76
2008	4.67	4.67	4.67	6.53
2009	5.57	5.57	5.57	3.57
2010	5.8	5.8	5.8	4.4
2011	6.15	6.15	6.15	3.82
2012	6.36	6.36	6.36	3.57
2013	6.67	6.67	6.67	3.97
2014	4.7	7.05	12.53	4.08
2015	4.82	7.22	12.85	2.13
2016	5.05	7.57	13.46	3.36
2017	5.56	8.33	14.81	6.77
2018	6	9	16	4.83

Fuente: Elaboración propia en base a los datos del SITAP (2019). Las tarifas se encuentran en precios constantes. Los precios fueron transformados a precios constantes con la inflación anual acumulada que publica el Banco de México y el INEGI 2006-2019.

Antes del proceso de concesión la justificación del incremento de las tarifas era la inflación anual debido al precio de los insumos para la operación y la energía eléctrica, un problema recurrente en todos los Organismos Operadores de México (CEED 2019, p.32), y una realidad macroeconómica que impacta a los entes productivos y de servicios, no obstante la realidad de las cifras oficiales ofrece una perspectiva formal de los incrementos, asimismo, el SITAP trabaja simplemente como un banco de datos, donde cada uno de los Organismos Operadores manda su

información en el supuesto que son apegados a la realidad social (SITAP, 2019). Incluso investigaciones como la de Moreno Quezada (2020) revela que la situación del incremento tarifario va más allá que solo un ajuste de costos. Este estudio fue realizado en 80 ciudades con servicio medido y a nivel nacional las tarifas de agua se incrementaron en 6.8% tarifa baja, tarifa media en 6.4% y 6.87% la tarifa alta, por lo que se pudo observar un incremento de las tarifas en un porcentaje de 80% superior a la inflación registrada. De acuerdo con Quezada (2020)

estas variaciones mostraron que la velocidad del incremento de las tarifas está relacionada con la atracción de inversiones. Es decir, a mayor facilidad de incrementar la tarifa de agua, mayor atractivo para invertir de acuerdo con los criterios de apertura de empresas, obtención de permisos de construcción, registro de propiedades y cumplimiento de contratos que utiliza el ranking de Doing Business México. El

Tribunal Colegiado en Materia Administrativa del Sexto Circuito determinó que son inconstitucionales las tarifas del agua que aprobó el Congreso de Puebla en 2014 y que aplica en la capital del estado la concesionaria Agua de Puebla, por permitir aumentos mensuales en los últimos cinco años que en algunos casos triplicaron el costo del servicio (García Otero, 2020).

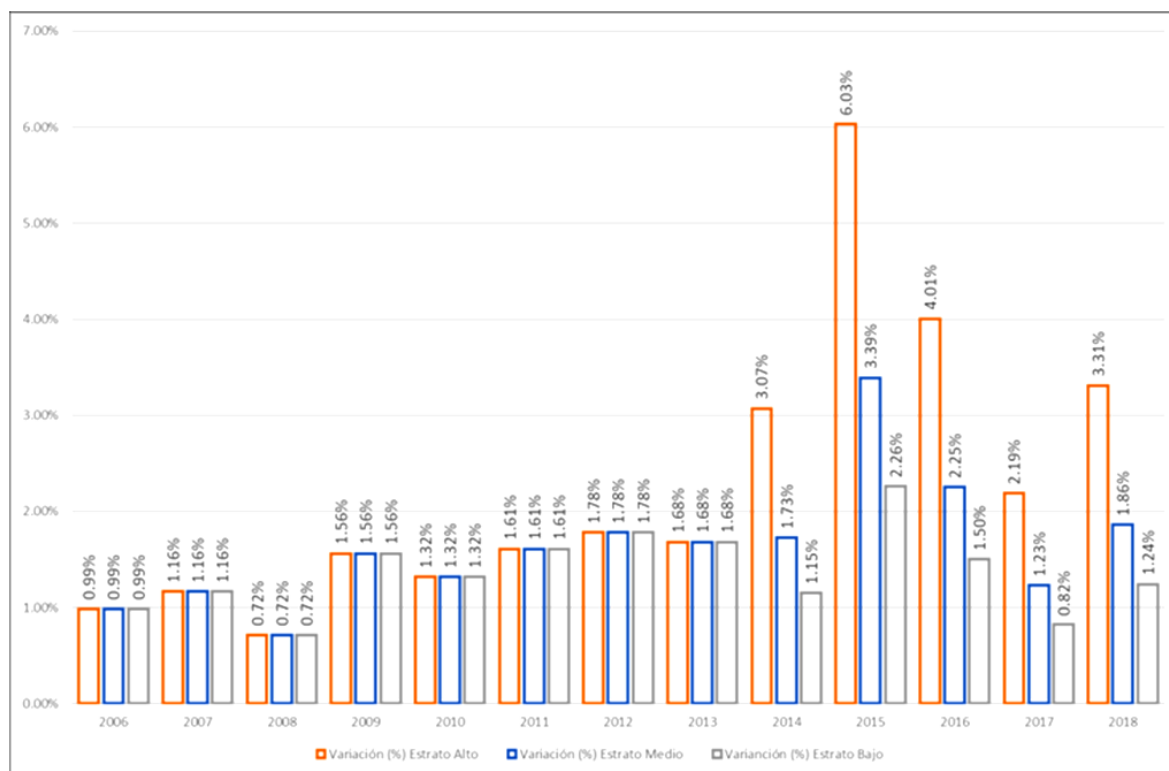


Figura 2. Variaciones de las tarifas de agua potable (precios constantes al 2006)

Fuente: Elaboración propia en base a datos del SITAP (2019).

Los años con incrementos más fuertes fue en 2015 y 2016, al final el incremento de la serie es de un 17.80% para Bajo, 21.28% para Medio y 29.43% para Alto acumulado al 2018. El 2015 fue un año decisivo en la política Estatal, debido al proceso electoral del 2017 (Diario Cambio, 2015). Numerosas quejas se pueden visualizar en medios electrónicos y de difusión local principalmente en cobros excesivos y corte de servicio en la Ciudad de Puebla y cada año van incrementando, por ejemplo, de enero a mayo de 2018 se presentaron ante la Procuraduría Federal del Consumidor 237 quejas, y a finales de 2018 este número se triplicó (de la Luz, 2019). La percepción social es diferente a los incrementos publicados oficialmente. En los indicadores oficiales de gestión, la empresa Agua de Puebla para Todos, no reportó su

indicador “Reclamaciones por cada mil tomas” el cual refleja la satisfacción del servicio y su valor está dado en la cantidad de reclamaciones por cada mil tomas. Este valor no se reporta al Programa de Indicadores de Gestión de los Organismos Operadores (PIGOO) desde 2010 desconociendo su causa, sin embargo, en entrevista con el delegado de la PROFECO-Puebla, se han presentado dos mil quejas a noviembre de 2019 contra Agua de Puebla para Todos (López, 2019) y con información que tienen los regidores de Puebla, de 2014 a la fecha se ha registrado aumentos en las tarifas por parte de la empresa Agua de Puebla. El sector de “Clase Alta” ha registrado un aumento de 122% en la tarifa, el más alto de los seis estratos. La tarifa para hogares de “Clase Alta” es la que más ha aumentado en los años

de operación de la concesión. En 2013, era de 10.80 pesos por metro cúbico. Para 2018, ya es de 24.03 pesos. De este modo, se observa un aumento de 122%. El tabulador de la “Clase Media” aumentó 30.5% al pasar de 10.80 pesos a 14.09 pesos por metro cúbico. El rubro de “Clase Baja” es el que tuvo el menor incremento. El costo creció 2.1% y actualmente pagan 11.03 pesos por metro cúbico. Es preciso mencionar que en este sector falta precisar las tarifas aplicables pues Agua de Puebla no tiene cobertura en zonas marginadas y aun así logra hacer cobros (Rivera, 2019).

Los cobros excesivos son la parte más fuerte dentro de los abusos de la empresa Agua de Puebla, uno de los actores que ha estado al frente de frenar los abusos es la Asamblea Social del Agua (ASA) la cual ha enfrentado y documentado desde prácticamente el inicio de la concesión cientos de casos de abuso de cobro, los cuales varía en 200 y 600% de incremento (Llaven, 2019a). Dichos abusos no discriminar usuarios ni posición social, de acuerdo con información recabada en medios locales, uno de los actores más afectados han sido las escuelas privadas de educación básica, poco más del 50% de los colegios afiliados a la Federación de Escuelas Particulares de Puebla han tenido problemas al pagar sus recibos debido a la Pandemia del virus SARS-Cov-2, conocido popularmente como COVID-19. Al acatar las recomendaciones de la Secretaría de Salud (SS) no hay clases presenciales en México, por lo que el consumo de agua baja drásticamente en las instituciones de educación, no obstante, los recibos superan los 10 mil pesos mexicanos al mes. La problemática se agrava ya que cerca del 40% de los alumnos inscritos han tenido que migrar a la educación pública disminuyendo drásticamente la entrada de ingresos, al tratar de buscar diálogo con la empresa concesionaria estos fueron rechazados y se negó a llegar a un acuerdo para solventar las deudas (Gutiérrez, 2020).

Cuando se interpone un juicio en contra de un corte de agua, el juez ordena a la empresa que acredite el adeudo, que publique el método para calcular y la fórmula en el cobro de la tarifa. Sin embargo, la empresa concesionaria nunca lo ha podido acreditar, por eso se ganan los juicios Declarado por Omar Jiménez Castro 2019 en Llaven (2019c). El año 2019 fue el año con más conflicto entre los usuarios y la empresa concesionaria reflejado en 480 juicios de amparo para frenar los cortes de servicio por lo que Llaven (2019a) asegura que dicho acto provocó que cortaran el agua y el drenaje a 100 mil usuarios, por

lo que el cabido de la Ciudad de Puebla aprobó por mayoría suspender los cortes de servicio de agua y drenaje tomando como sustento la violencia contra la constitución y el derecho humano al agua. Más aún, la concesionaria tiene empresas contratadas en *outsourcing* dedicadas a realizar los cortes del servicio sin que les finquen responsabilidades legales al atentar en contra del derecho humano al agua y al daño a las banquetas y calles por la ruptura de concretos y asfaltos (Llaven, 2019b).

El monopolio de los servicios de agua no es diferente a cualquier otro, las acciones que toma para dominar el mercado se ven reflejadas en los datos, aunque las cifras publicadas no empatan con la realidad social, no se puede ocultar la forma original. De forma empírica los incrementos se denotan en los tres estratos generales, por lo que es otra señal de su forma monopólica, el no existir discriminación de los consumidores, sino en el apoderamiento del mercado a través del control de la oferta y demanda disponible.

#### **4. DISCRIMINACIÓN DE PRECIOS DE TERCER GRADO Y EFECTOS SOBRE EL BIENESTAR SOCIAL EN LAS TARIFAS DE AGUA DE LA CIUDAD DE PUEBLA**

La discriminación de precios en economía consiste en vender el mismo producto a diferente precio de acuerdo con la capacidad de pago del comprador. Dicha práctica es por definición conveniente para el ofertante ya que tiene la posibilidad de vender el mismo producto a diferentes precios, eso impacta directamente en su margen de ganancia ya que obtiene un mayor porcentaje que con precios uniformes (Philps 1988, p. 136). El objetivo de la discriminación de precios es extraer el excedente del consumidor para incrementar los beneficios del vendedor. Como todo postulado económico requiere de supuestos y condicionantes para su aplicación y con el cumplimiento de ellos buscan utilidades; de acuerdo con Quiroga Glave (2006) existen condiciones para que la discriminación de precios se pueda aplicar con éxito. La primera condición es “quien discrimina debe de tener control del precio” un proceso de segregación de mercado conforme a las características fisiológicas, económicas o sociales de la población objetivo. Por ejemplo, las entradas para estudiantes a los museos son comúnmente menores que para el público en general, los descuentos a las personas de la tercera edad e incluso puede darse la segmentación en momentos de tiempo

y espacio específicos, como el Happy Hour en bares y restaurantes.

La segunda condicionante se refiere a la capacidad de poder dividir a sus consumidores de acuerdo con su capacidad de pago, relacionada directamente con la primera condicionante, pero con la diferencia de que en este caso se realiza la segmentación por tipo de mercados, separables o separados e identificados de acuerdo con la disposición marginal a pagar por un bien o servicio. Es decir, un comprador con mayor capacidad de compra puede y está dispuesto a pagar más por el mismo bien o un bien sustituto para poder adquirir el bien a diferencia de los demás compradores. Un ejemplo habitual son las distintas marcas de automóviles, los precios varían entre marcas y entre versiones de los modelos, lo cual incentiva a que el propio consumidor limite su decisión y se auto discrimine al no poder acceder a modelos, marcas o versiones que superen su capacidad de compra.

La tercera y al parecer la más compleja se refiere a que “el grupo de compradores que paga menos no debe tener la posibilidad de poder revender sus bienes o servicios a quienes supuestamente pagan un precio más alto”. La complejidad referida señala que hay dos aspectos en los que la reventa puede imposibilitarse, el primero y el más claro es en los servicios personales (educación, servicios médicos, servicios funerarios) que en el sentido estricto puede aceptarse esta aseveración, pero en una visión flexible se podrían extrapolar hacia otros usuarios que no puedan acceder a ellos, pero ello se vería reflejado en un incremento de los costos y así mismo en el precio final, generando nuevamente un proceso de discriminación de compradores. En el caso de los bienes, la reventa similar a lo que pasa con los servicios, se vería alterada por incrementos en los costos de transporte, almacenaje, distribución, conducción, permisos etc. Hasta llegar nuevamente a un punto límite dentro de la recta presupuestaria de cada uno de los compradores.



Figura 3. Discriminación de precios de tercer grado. Representación gráfica  
Fuente: Elaboración propia en base a (Philps, 1988)

La ilustración muestra la curva de demanda (D), el costo marginal (Cmg) y el Ingreso Marginal (Img) de dos productos similares pero vendidos a dos diferentes compradores (1) y (2). El precio óptimo del monopolio de cada uno de los clientes es el punto (q,p) respectivamente. Cada uno muestra el nivel de consumo (q) y el precio máximo para su adquisición (p). Se puede observar que el comprador (1) tiene un precio más alto a un nivel de consumo relativamente mayor que el cliente (2). Así mismo el cliente (2)

tiene un menor precio del producto (q) a una cantidad similar de dotación.

El punto de equilibrio del monopolio es cuando la curva de Img y de Cmg, cuando la curva de Demanda sea mayor que el Cmg, es decir, que los beneficios que obtiene el comprador son mayores que el productor y este beneficio aumentará solo si aumenta la oferta del monopolista hasta llegar al punto donde se cruza la demanda con el Cmg. El monopolista sabe de ello y no le preocupa, debido a que controla la oferta, y prefiere ubicar su oferta a niveles inferiores

de los que la sociedad puede acceder para forzar la necesidad y así obtener un consumo constate y seguro. Este recorte de la oferta disponible se conoce como “Costo Social del Monopolio” (Harberger 1954, p. 78), aún así el monopolio logra colocar un precio más alto que en competencia perfecta, ya que en ese caso el precio sería igual al costo marginal mientras que el monopolio el precio es mayor al Cmg.

Desde la perspectiva social, el primer postulado provoca mayor atención ante la posibilidad de intervenir en el mercado con total facilidad para manipular los precios. Esta facilidad es una de las características del monopolio, pero también se puede presentar en competencia perfecta si se cuenta con la información adecuada del consumidor (edad, ocupación, género, ubicación, etc.) y que puede ser utilizada para sesgar su decisión de compra; incluso puede darse en casos de oligopolios donde su capacidad de obtener información es la forma de controlar el mercado. En el caso de la discriminación de precios de primer y segundo grado, teóricamente funcionarían con éxito cuando la empresa se apodera de todas las ganancias que genera la venta de un bien o servicio. Pero debido a los cambios en las decisiones de compra, llega a tornarse difícil seguir las tendencias del mercado ajustando los precios a fin. Es decir, la demanda debería ser inelástica para poder mantener el mismo nivel de precios de mercado y consolidar su poder. Estas pequeñas variaciones en el perfil del consumidor, provoca que la empresa no arraigue su dominio lo que ocasiona que no pueda adueñarse totalmente de las ganancias (Quiroga Glave, 2006).

En este caso y aplicándose al problema de las tarifas de agua en la Ciudad de Puebla, se estudia la discriminación de precios de tercer grado, con el fin de demostrar desde la teoría económica que la aplicación de dicho postulado prefiere la maximización de la ganancia antes del bienestar social. La discriminación de precios aplicada a bienes y servicios de lujo es una excelente herramienta para poder obtener el máximo nivel de ganancia de acuerdo con la capacidad de pago del comprador, y no dejarlo afuera de la posibilidad de consumo. En el caso de los bienes de consumo básico, la discriminación de precios tiene una connotación social al visualizar su carácter de exclusividad al condicionar los bienes básicos para el desarrollo humano. El acceso al agua no puede ser condicionado por las particularidades de los clientes, por lo que esta herramienta del monopolio impacta directamente

con el Derecho Humano al Agua de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Las técnicas aplicadas para poder llegar a la gráfica de discriminación se realizaron con el fin de tener una herramienta de análisis visual y de fácil comprensión para observar los efectos entre los diferentes usuarios. El esquema tarifario de Agua de Puebla se publica mensualmente en su página web, y establece seis estratos para uso doméstico de acuerdo con la colonia, infraestructura pública, capacidad de pago y tipo de vivienda de los usuarios.

El consumo de agua promedio para un mexicano es de 380 litros por habitante al día, lo que comprende su alimentación, consumo, lavado e higiene, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en México existen 32 millones 925 mil hogares y en promedio, en cada uno de ellos habitan 4.1 personas por lo que se necesita mínimo contar con 1,520 litros diarios (INEGI, 2010). Para el caso de la Ciudad de Puebla se estima un consumo de 200 litros por habitante al día siendo así que serían necesarios 820 litros en un hogar (Flores, 2016). En una investigación del *World Resources Institute* (WRI) se reveló a través de un software de mapeo que la Ciudad de Puebla se encuentra en Alto Riesgo de sus recursos hídricos los cuales se compone de los temas Riesgo en Cantidad, Riesgo en Calidad y Riesgo Reglamentario y Reputacional el cual sirvió de base para este ejercicio (WRI, 2020).

Así mismo se toman las condiciones básicas de consumo, con un máximo de 15 metros cúbicos por hogar. De acuerdo a la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos en los Hogares (ENIGH) 2018 el promedio de integrantes por hogar es de 3.6 habitantes, si se considera los 15 mil litros y se dividen entre 3.6 habitantes el resultado es de 4,166.66 L/hab, para conocer la dotación diaria, se divide esta cifra entre un mes de servicio lo que da como resultado 138.88 L/hab/día, cifra muy cercana al límite que tiene la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como dotación mínima por habitante de 100 L/hab/día (ENIGH, 2018). Se tomará esta dotación como la básica para las necesidades de un habitante de la ciudad de Puebla, sin embargo, se advierte que esta cifra no comprende otros usos que no sean para consumo e higiene en el hogar.

La base de datos reportada en el SITAP muestra por facilidad de manejo tres estratos generales: bajo, medio y alto. Para este caso se toman los datos reportados al SITAP y conforme a la compilación ya

hecha y por la serie histórica que va desde el 2006 al 2018. Debido a la dispersión de los datos en las tarifas de agua entre años se realizó un ejercicio de normalización de series de tiempo para poder definir una serie de tiempo uniforme. A causa de las variaciones superiores e inferiores de las tarifas a lo largo de la serie de tiempo se optó por darle un

tratamiento para normalizar la serie y lograr un crecimiento uniforme conforme a los límites máximos y mínimos de crecimiento. La tasa de crecimiento fue denominada: “Variación anual de las tarifas”, para la serie normalizada y se calculó conforme a la fórmula general de la pendiente de la siguiente manera:

Variación anual de las tarifas de agua potable para la Ciudad de Puebla. Serie normalizada.

$$V_{\text{anual}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}}{X_n - 1} / Y_{\text{max}} \quad (1)$$

Donde:

$Y_{\text{max}}$ =Tarifa más alta de la serie de tiempo

$Y_{\text{min}}$ = Tarifa más baja de la serie de tiempo

$X_n$ = Numero de observaciones en la serie de tiempo

Se aplica el valor de la  $V_{\text{anual}}$  sobre los valores de la serie de tiempo lo que da como resultado una serie uniforme con pendiente positiva. Para visualizar la

diferencia se muestra como ejemplo la siguiente comparación:

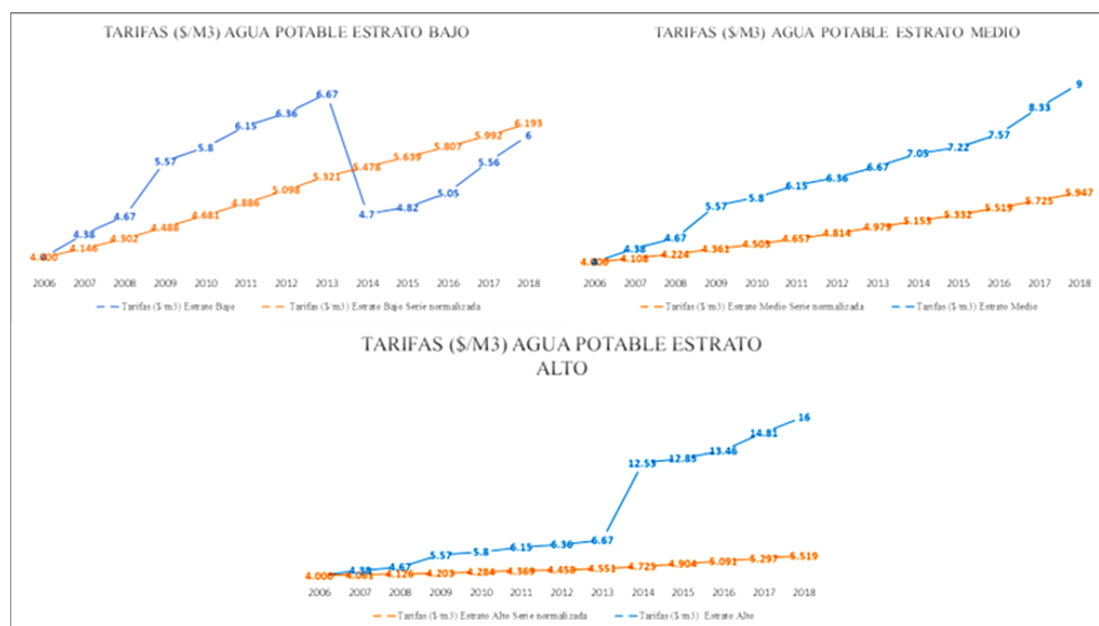


Figura 4. Comparación de series de tiempo sin tratamiento y con tratamiento de normalización  
Fuente: Elaboración propia en base a datos del SITAP (2019)

La gráfica representa los valores tomados directamente de la base de datos del SITAP para las tarifas de agua potable de uso doméstico en la Ciudad de Puebla. Las variaciones en los precios dificultan calcular una línea de tendencia propia para poder definir una relación directa entre tarifa y dotación por

lo que el proceso de normalización de series de tiempo facilita el análisis estadístico al eliminar las variables que generan ruido en la serie de tiempo. Ese mismo tratamiento se aplicó a los tres estratos tarifarios y a los datos de dotación extraídos del sistema del Programa de Indicadores de Gestión de

Organismos Operadores de Agua (PIGOO) del IMTA.

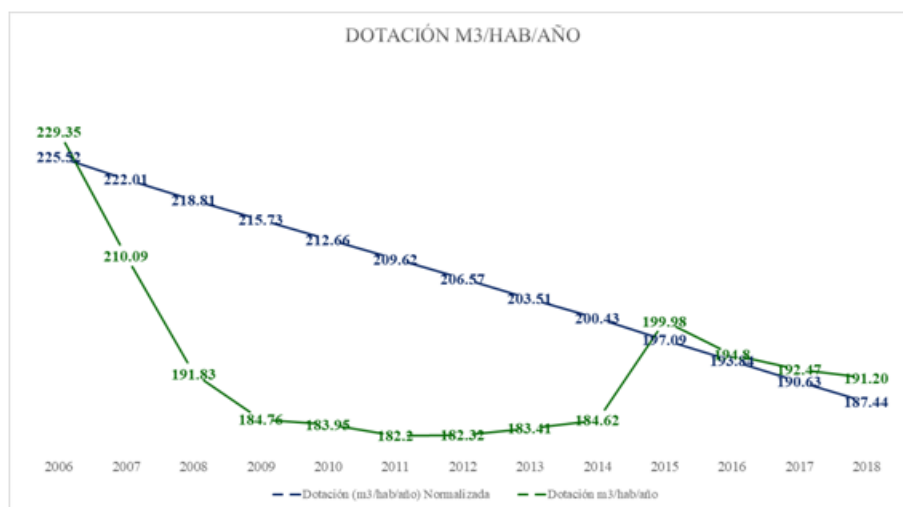


Figura 5. Normalización de la dotación reportada para la Ciudad de Puebla en m3/hab/año  
Fuente: Elaboración propia en base a los datos reportados al PIGOO (2019)

La normalización refleja un promedio de dotación hacia todos los habitantes, pero se sabe en la práctica que la dotación cambia por tipo de usuario, es decir va en función de su estrato. Para este ejercicio se tomó como supuesto que la dotación reportada cubre las necesidades básicas de consumo e higiene para la población de la Ciudad de Puebla, sin tener en cuenta los usos recreativos, sociales, religiosos u otros que son propios de cada estrato y de la cultura de

consumo del poblano que no han ido en desuso. Con los ejercicios de normalización de datos se puede graficar la influencia del monopolio del servicio de agua en la Ciudad de Puebla. Se realizó un ejercicio de regresión lineal para obtener las funciones y proyectar la demanda de cada uno de los estratos. La demanda está compuesta de las tarifas entre la dotación. Se comprueba conforme al coeficiente de determinación que la serie de tiempo es significativo.

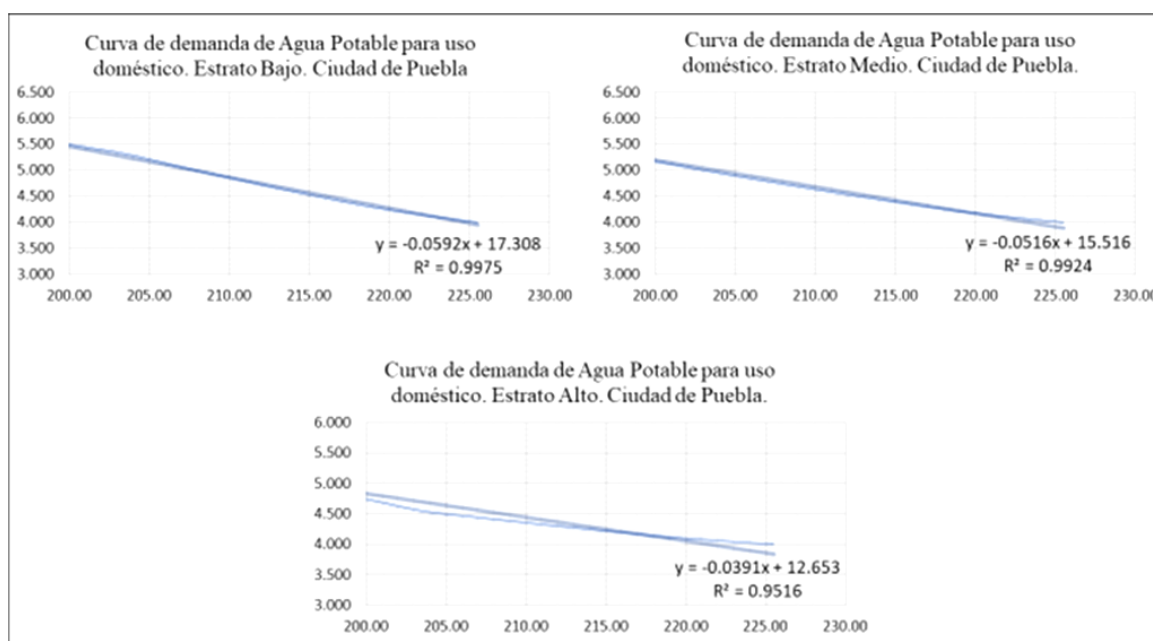


Figura 6. Demanda de Agua Potable (\$/m<sup>3</sup>)/ Dotación (m<sup>3</sup>/hab/año) para la Ciudad de Puebla. Regresión lineal y prueba R2

Fuente: Elaboración propia en base a las tarifas de agua para uso doméstico del SITAP (2019)

Es una serie normalizada de 2006 a 2018. La regresión lineal elimina las variaciones de los datos. A un nivel de significancia del 95% todos resultan significativos, a un nivel de significancia del 99% sólo el Estrato Alto pierde significancia.

Con la regresión lineal se generaron las funciones de demanda para cada uno de los estratos. Este paso es fundamental ya que la curva de demanda ahora puede proyectar la forma básica del monopolio. La curva de demanda en competencia perfecta es perfectamente elástica, es decir, el consumo responde rápidamente a variaciones del precio en el mercado que pueden proyectarse al infinito, por lo que su curva se presenta de forma horizontal ya que el precio fijado lo mantiene la propia competencia del mercado. En el caso de los monopolios y de los bienes de consumo básico, la elasticidad tiende a ser inelástica debido a que tienen pocos sustitutos o en algunos casos ninguno (Arbúes, García-Valiñas, & Martínez-Espiñeira, 2003, pág. 84).

Estos cambios en los precios se refieren a la necesidad de consumo que tiene cada comprador. En los bienes que no son de primera necesidad como los de lujo o recreativos su demanda es elástica ya que los consumidores pueden encontrar fácilmente bienes sustitutos o abstenerse de consumirlos, por lo que los precios bajarán para facilitar la adquisición o subirán si la demanda de estos se incrementa. Estas condiciones están relacionadas con la capacidad de pago de los compradores, a mayor ingreso su propensión a consumir bienes de precios altos es mayor y así su facilidad para los de menor precio. Así mismo con los consumidores donde su restricción presupuestaria frena la propensión marginal a consumir bienes con precios superiores a su límite, por lo que solo tienen la opción de consumir bienes sustitutos o anular su consumo.

Diversos autores han calculado la demanda de agua en sus regiones de estudio y con distintas metodologías como (Comellas, 2018; Salazar Adams & Pineda Pablos, 2010; de Groot, Nijkamp, & Dalhulsen, 2003; Arbúes, García-Valiñas, & Martínez-Espiñeira, 2003; Anele, Todini, Haman, & Abu-Mahfouz, 2018; Cairncross & Kinnear, 1992; Chini & Stillwell, 2020; Dalhuisen, Florax, de Groot, & Nijkamp, 2003, Maas, Goemans, Manning, Burkhardt, & Arabi, 2018) las cuales definen a la demanda de agua con una forma cambiante que depende de distintos contextos y situaciones. El

cálculo se puede hacer con diferentes herramientas de la econometría y la microeconomía, pero se concluye que al ser un bien primario para la vida, su elasticidad tiende a ser inelástica. Si bien existen cambios tecnológicos que mejoran la situación de las tarifas a nivel mundial, Comellas (2018) logra definir a nivel social la importancia del análisis tarifario y los estudios de demanda de agua desde la teoría económica:

*...Estos valores relativamente inelásticos de la función de demanda de agua potable, acotan la capacidad del sistema tarifario de cobro volumétrico para morigerar la cantidad demandada del recurso y generar equidad en los cargos. Lo anterior pone en relevancia la necesidad de implementar juntamente con los instrumentos económicos, una serie de instrumentos de política extra-precio, orientados al manejo de la demanda. Estos instrumentos alternativos, coadyuvando con un adecuado diseño tarifario, resultarían ser importantes y significativos: las campañas de información, los subsidios por adopción de tecnologías, las sanciones por derroche y el racionamiento del agua, aparecen todas como alternativas más significativas que la sola adopción de una política tarifaria aislada (Comellas, 2018, p.14).*

La función de demanda de la Ciudad de Puebla es el resultado de la regresión lineal de las tarifas aplicables entre la dotación reportada. También como era de esperarse, tiende a ser inelástica la tabla 4 lo que indica que aún en cambios de la dotación, el precio resultaría sin cambios significativos.

Si se toma el consumo como variable de oferta disponible en lugar de la dotación como lo hace (Amos, Todini, Hamam, & Abu-Mahfouz, 2018), (Arbúes, García-Valiñas, & Martínez-Espiñeira, 2003), (Puri & Maas, 2020) el resultado estaría fijado en la disponibilidad marginal del propio consumidor, en otras palabras la dotación, pero para el caso de la Ciudad de Puebla, los problemas para conocer el valor exacto del consumo del agua por hogar están ligados a lograr la cobertura total de micro medición en hogares lo que han resultado un tropiezo en las administraciones ya que ninguna ha podido afrontar el reto.



Solo el 13.76% de las tomas cuentan con micro medición (PIGOO, 2019) y se entiende que el problema va más allá que realizar la inversión y colocar los dispositivos en las casas. La instalación improvisada de los cuadros de servicio, las tomas clandestinas, el pillaje y otras acciones conocidas por la experiencia dificultan la aplicación, no obstante las mejores ciudades del mundo cuentan y promueven la

micro medición como una herramienta que fomenta el buen uso del recurso y el cuidado del mismo. En otros problemas, y de acuerdo con (Salazar Adams & Pineda Pablos, 2010), la dificultad para encontrar información disponible en México para la elaboración de modelos estadísticos tan refinados como los de Estados Unidos o los europeos es uno de los retos en el análisis económico tarifario.

Tabla 4. Elasticidad precio de la demanda de los estratos de cobro de agua potable uso doméstico de la Ciudad de Puebla

AÑO	BAJO	MEDIO	ALTO
2006	0	0	0
2007	-0.45	-0.60	-1.05
2008	-0.40	-0.54	-0.93
2009	-0.35	-0.45	-0.78
2010	-0.35	-0.45	-0.77
2011	-0.35	-0.44	-0.74
2012	-0.35	-0.45	-0.74
2013	-0.36	-0.45	-0.74
2014	-0.54	-0.45	-0.42
2015	-0.59	-0.51	-0.46
2016	-0.58	-0.49	-0.46
2017	-0.54	-0.47	-0.43
2018	-0.53	-0.46	-0.42

Fuente: Elaboración propia en base a las tarifas de agua para uso doméstico del SITAP (2019). El signo negativo es propio de la relación inversa de la demanda. Solamente el periodo 2006-2007 del estrato alto muestra elasticidad (1.05) más adelante vuelve a mostrar características inelásticas

Debido a ello, se toma el valor de la dotación (m<sup>3</sup>/hab/año) como el valor de la oferta disponible, y con el ejercicio de regresión las ecuaciones

resultantes de demanda para cada uno de los estratos son las siguientes:

Función de demanda del Estrato Bajo para la Ciudad de Puebla.

$$f \text{ demanda bajo}(t/d) = 17.308 - 0.0592x \quad (2)$$

Función de demanda del Estrato Medio para la Ciudad de Puebla.

$$f \text{ demanda medio}(t/d) = 15.516 - 0.0516x \quad (3)$$

Función de demanda del Estrato Alto para la Ciudad de Puebla.

$$f \text{ demanda alto}(t/d) = 12.653 - 0.0391x \quad (4)$$

Con estas funciones se calculó el costo social del monopolio conforme a la metodología de (Harberger

1954) por lo que las gráficas para cada uno de los estratos son las siguientes:

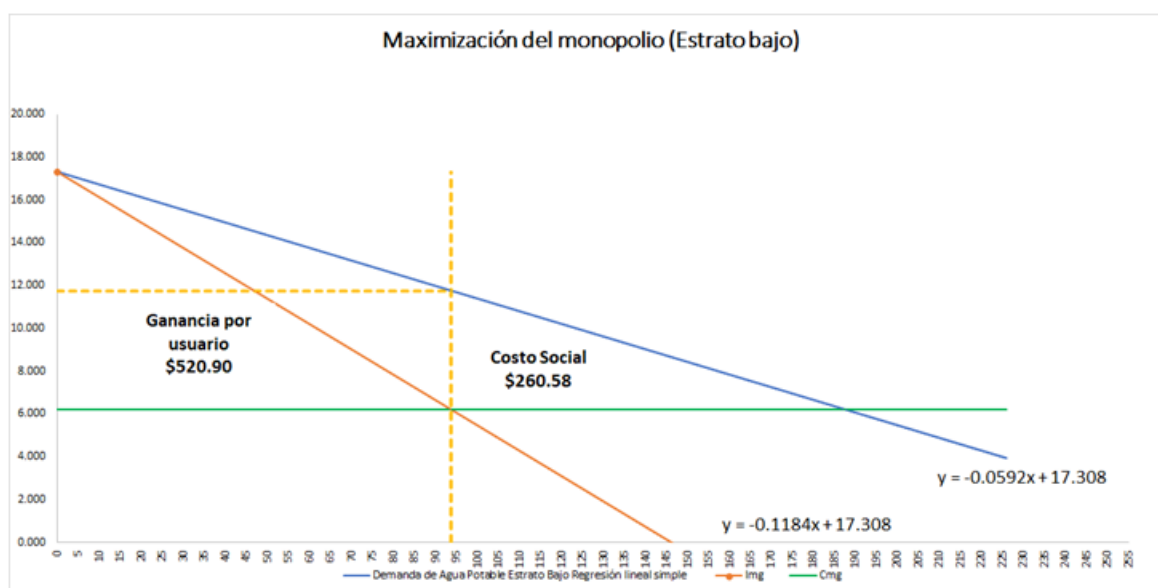


Figura 7. Maximización de beneficios del monopolio de los servicios de agua y discriminación de precios de tercer grado. Estrato Bajo. Serie 2006-2018. Fuente: Elaboración propia 2020.

El área del recuadro en línea punteada muestra el beneficio del monopolio de Agua de Puebla para las tarifas bajas. Opera entre 0-93 metros cúbicos anuales por un precio entre \$6.19 y \$11.74 pesos, es decir, un recibo anual de \$1,091.82 pesos con una dotación reportada de 20 metros cúbicos. En base a lo publicado en la estructura tarifaria de Agua de Puebla

y haciendo el cálculo respectivo por estrado la tarifa varía entre \$3,052.80 y \$4,500 anuales (Periodico Oficial, 2018). El excedente radica en que la dotación reportada varía entre 500 y 650 l/hab/día sin embargo el consumo de un ciudadano de Puebla como se mencionó varía entre 250 y 300 L/hab/día. Hay un excedente cobrado del doble de lo no consumido.

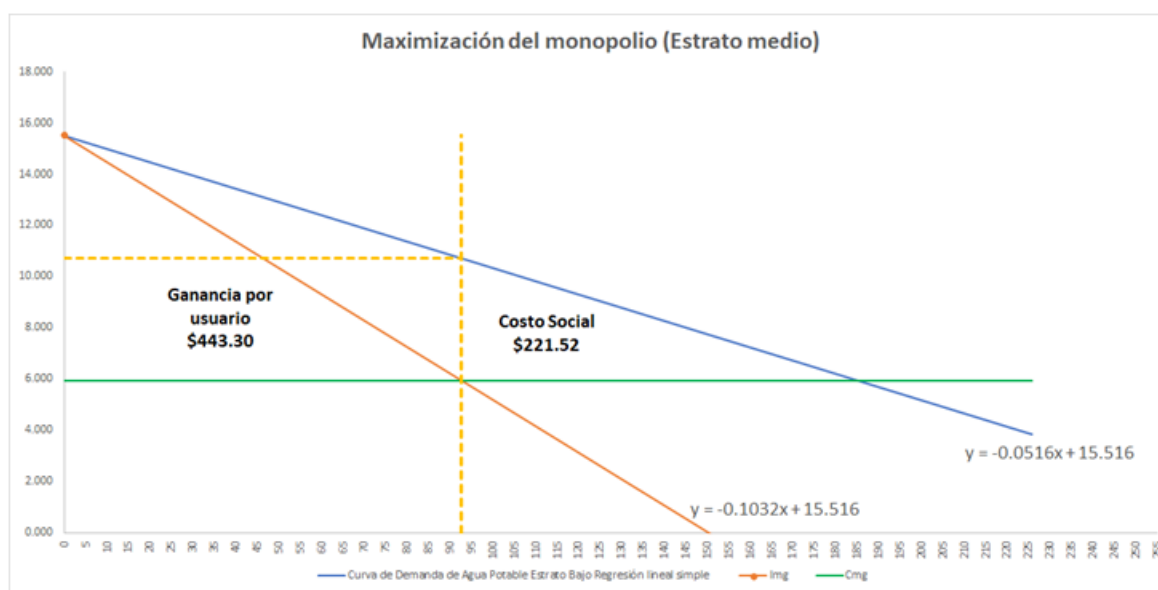


Figura 8. Maximización de beneficios del monopolio de los servicios de agua y discriminación de precios de tercer grado. Estrato Medio. Serie 2006-2018

Fuente: Elaboración propia 2020.

El área del recuadro en línea punteada muestra el beneficio del monopolio de Agua de Puebla para las tarifas bajas. Opera entre 0-93 metros cúbicos anuales por un precio entre \$5.95 y \$10.73 pesos, es decir, un recibo anual de \$2.575.20 pesos con una

dotación reportada de 20 metros cúbicos. En base a lo publicado en la estructura tarifaria de Agua de Puebla y haciendo el cálculo respectivo por estrado la tarifa varía entre \$3,500 y \$4,500 anuales (Periodico Oficial, 2018).

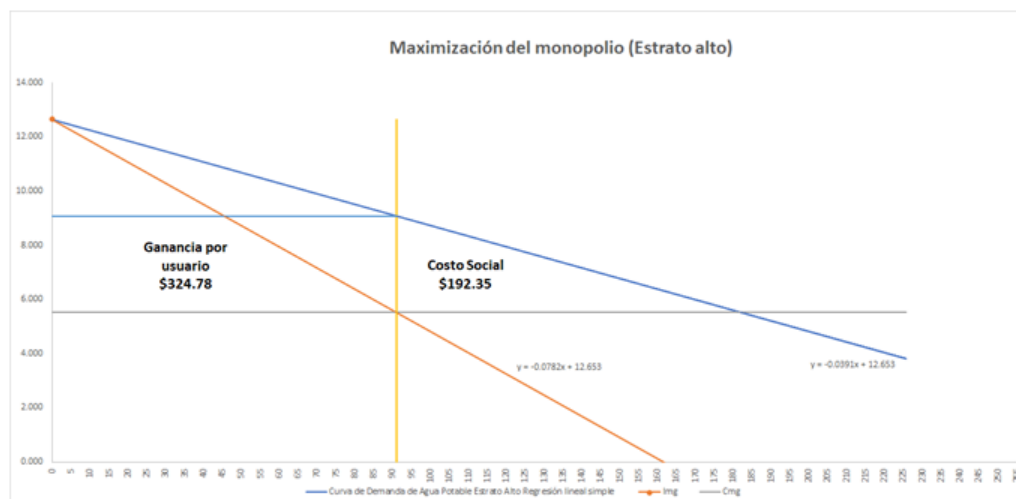


Figura 9. Maximización de beneficios del monopolio de los servicios de agua y discriminación de precios de tercer grado. Estrato Alto. Serie 2006-2018. Fuente: Elaboración propia 2020.

El área del recuadro en línea punteada muestra el beneficio del monopolio de Agua de Puebla para las tarifas bajas. Opera entre 0-93 metros cúbicos anuales por un precio entre \$5.52 y \$9.08 pesos, es decir, un recibo anual de \$3,036.72 pesos con una dotación reportada de 20 metros cúbicos. En base a lo publicado en la estructura tarifaria de Agua de Puebla y haciendo el cálculo respectivo por estrado la tarifa varía entre \$4800 y \$5,600 anuales (Periodico Oficial, 2018). En resumen, se puede observar la funcionalidad del monopolio con la herramienta de discriminación de precios. De acuerdo a la metodología de Hargberger, el costo social, es decir, la ineficiencia del monopolio le está costando más al estrato bajo que al medio y al alto (14.98% y 26.18% respectivamente), se observa que aunque existan políticas de cobro hacia los usuarios con más ingresos, no serán significativas hasta que se aplican políticas de control de precios como la aplicación de subvenciones, de incentivos de descuento para la aplicación de tecnologías ahorradoras, el manejo de descuentos hacia usuarios cumplidos, y la solución pronta a las quejas de los usuarios (Aguilar Benítez & Saphores, 2009; Revollo-Fernández, Rodríguez-Tapia, & Morales-Novelo, 2019; Yepes, 2003). El

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) muestra las dificultades sociales que tienen los municipios y ubica a la Ciudad de Puebla como uno de los municipios con mayores carencias sociales de México. Alrededor de 40.5% de la población del Municipio de Puebla, se encuentra en situación de pobreza y 3.8% en pobreza extrema de acuerdo con su informe en 2015. Así mismo 36.9% de la población tiene un nivel moderado de pobreza y 138,888 personas tienen carencias por acceso a los servicios básicos en la vivienda, y más del 50% de la población (equivalente a 878,992 habitantes) cuentan con un ingreso inferior a la línea del bienestar la cual equivale al valor total de la canasta alimentaria y de la canasta no alimentaria por mes (CONEVAL, 2015) (CONEVAL, 2020). El cuanto al ingreso, en su informe de 2018, determinó al Estado de Puebla como una de las entidades con menor ingreso corriente, entre \$2,500.00 y \$3,500.00 pesos mexicanos es lo que percibe un Poblano, una cifra menor si se compara con el promedio nacional de \$3,628.00 pesos mexicanos, aproximadamente \$125 US, \$175 US y \$181.4 US al mes en noviembre de 2020 (CONEVAL, 2018). Para el caso de la capital

del estado, el ingreso promedio no difiere mucho del promedio estatal el cual es de \$4,650 pesos al mes (ENOE, 2020), estas limitaciones del ingreso se ven reflejadas en la asequibilidad del agua para el ciudadano promedio, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) sugiere que el costo del agua no debería superar el 3% de los ingresos del hogar, regla que no se cumple para los ciudadanos aún con dos salarios por hogar (ONU, 2011). De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) las tarifas de agua potable se pueden calcular desde la perspectiva de la teoría económica conforme a los principios básicos de la oferta y la demanda, sin embargo desde la microeconomía la oferta se relaciona con el uso de diversos factores para la producción de un bien o servicio; y en el caso particular de los sistemas de agua potable esta se relaciona con la producción de agua para satisfacer las necesidades de agua potable, alcantarillado y saneamiento de las zonas urbanas (MAPAS, 2010). Los sistemas de abastecimiento de agua potable se ubican dentro de los denominados monopolios naturales, que se caracterizan por:

- Producir un bien no comerciable
- Representar significativas economías de escala en la inversión
- Requerir de montos de inversión elevados

Los monopolios de Estado son necesarios para buscar la administración de los bienes y no se generen mercados acaparadores de insumos o productos básicos para la vida. La libertad de mercado está mal entendida cuando se visualiza como la estricta aplicación del libre albedrío en la economía, conforme a estos análisis se refiere a la libertad de poder elegir cuales son las mejores decisiones de compra que tienen los usuarios. Los monopolios de agua, en este caso de servicios, frenan esta exageración de libertad económica, para poder otorgar de forma asequible agua a la población, por lo que se recalca que no se critica la esencia de los servicios público/privado, sino la aplicación de técnicas y herramientas que usa el capital privado para maximizar la ganancia a costa de la población.

## **5. REFLEXIONES FINALES Y CONCLUSIONES**

Cabe recalcar que la lucha no es en contra de la participación privada, sino en contra de la aplicación del poder a través del agua, imposiciones y regulaciones que no empatan con la cultura ni la

forma de vida de la región y que coadyuvan a ahondar más las desigualdades sociales. A nivel social, competir por la accesibilidad de agua para consumo humano debe de erradicarse de acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) y el Derecho Humano al Agua, pero las incoherencias entre el deber ser y la práctica normalizan las situaciones inverosímiles para abastecimiento de la población. El ejercicio de discriminación de precios es una herramienta para mostrar cuantitativamente la problemática en la cual está sumergida la población, conforme al informe de CONEVAL, el poder adquisitivo del ciudadano poblano está seriamente mermado por las condiciones del mercado laboral y la precariedad del salario, pero los ingresos conforme a la política de precios de la empresa concesionaria implica que debe cobrar un precio más alto cuando la variación de los precios es inelástica. La inelasticidad precio de la demanda, varía de acuerdo con la herramienta de cálculo y de la cantidad de información disponible, no obstante, se considera por la característica necesaria del agua que por definición económica es inelástica. Puede llegar a un punto a ser elástica, a corto plazo este mismo nivel de precios se ajusta para fijar un nuevo nivel, como se observó en los incrementos de las tarifas en los años 2015 y 2016 y en el Estrato Alto en el periodo 2006-2007. La perspectiva de visualizar la influencia del monopolio debe aplicarse cuando se conoce por definición que el bien a investigar no responde a variaciones en el precio ni en la cantidad demandada. La forma del monopolio es una función interpretativa de la realidad social de las tarifas. Esta aproximación se refleja, en las noticias y en las quejas de la ciudadanía que visualizan dichas prácticas monopólicas, pero no existe una demostración desde la teoría económica para estos casos, que refuerza la realidad vivida en la Ciudad de Puebla (García Bello, 2018) y como se aplican prácticas de control y discriminación de precios para el beneficio privado. El costo social calculado es una interpretación de la ineficiencia de la concesionaria. Este costo no puede ser amortizado en forma de inversión ya que son ganancias brutas, y debido a que el servicio se encuentra concesionado la reinversión del excedente no necesariamente va al beneficio público. La falta de transparencia del manejo de las inversiones es otra variable que debe ser resuelta para conocer la situación tarifaria de los ciudadanos. Un análisis del valor unitario de cada cobro conforme a los montos de inversión es un ejemplo de una herramienta de comunicación social de la empresa hacia los usuarios, pero la continua falta de transparencia fomenta la desconfianza

incrementando más la inconformidad de los usuarios, no sería extraño que en algún momento esta desconfianza se transforme en un movimiento social

que busque finiquitar las acciones de la empresa concesionaria a fin de terminar con las prácticas monopólicas que aplican hoy.

## REFERENCIAS

- Accinelli, E., & Tenorio, L. (2012). Monopolios naturales y tecnología. *Ensayos Revista de Economía*, XXXI(1), 99-115.
- Aguilar Benítez, I., & Saphores, J.-D. (2009). Aspectos institucionales y políticas para reforzar el pago de los servicios de agua en Nuevo Laredo, Tamaulipas y Laredo Texas. *Gestión y Política Pública*, 341-337.
- Amos, A., Todini, E., Hamam, Y., & Abu-Mahfouz, A. M. (2018). Predictive Uncertainty Estimation in Water Demand Forecasting Using the Model Conditional Processor. *Water*, X(475), 1-12.
- Anele, A. O., Todini, E., Haman, Y., & Abu-Mahfouz. (2018). Predictive Uncertainty Estimation in Water Demand Forecasting Using the Model Conditional Processor. *Water*, X(475), 1-12. doi:10.3390/w10040475
- Arbúes, F., García-Valiñas, M., & Martínez-Espiñeira, R. (2003). Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics*(32), 81-102. doi:10.1016/S1053-5357(03)00005-2
- Banco Mundial. (1999). *Bolivia: Revisión del Gasto Público*. Washington: Banco Mundial.
- Banco Mundial. (2000). Datos Bolivia-INB per cápita, método Atlas (\$US a precios actuales). Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GNP.PCAP.CD?locations=BO>
- Banco Mundial. (2006). *Redoblando el crecimiento para multiplicar el empleo*. WorldBank.
- Banco Mundial. (2018). Datos-Superficie (kilómetros cuadrados). Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.SRF.TOTL.K2>
- Banco Mundial. (04 de 11 de 2020). Banco Mundial Datos. Obtenido de Población, total-México: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?locations=MX>
- Cairncross, S., & Kinnear, J. (1992). Elasticity of demand for water in Khartoum, Sudan. *Social Science & Medicine*, XXXIV(2), 183-189.
- Calatrava-Leyva, J., & Garrido-Colmenero, A. (2001). Análisis del efecto de los mercados de agua sobre el beneficio de las explotaciones, la contaminación por nitratos y el empleo eventual agrario. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 1(2), 149-169.
- CEED. (2019). *Análisis de las tarifas eléctricas en los sistemas de agua potable y saneamiento de México*. Ciudad de México: El Colegio de México.
- Chini, C., & Stillwell, A. (2020). One Model Does Not Fit All: Bottom-Up Indicators of Residential Water Use Provide Limited Explanation of Urban Water Fluxes. *American Society of Civil Engineers.*, VI(3), 1-10.
- CNA. (2010). *Guía sobre la participación privada en la prestación de los servicios de agua y saneamiento*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Comellas, E. A. (2018). Estimación de la elasticidad precio de la demanda del agua potable provista por red y sus implicaciones en los patrones de consumo de los usuarios del servicio. 4° Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos.
- CONAGUA. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua .
- CONEVAL. (2015). *Evolución de las líneas de bienestar y de la canasta alimentaria*. Recuperado el 30 de 11 de 2020, de <http://webdrp.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Lineas-de-bienestar-y-canasta-basica.aspx>
- CONEVAL. (2018). *Informe de Evaluación de la Política de Desarrollo Social*. Ciudad de México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.

- CONEVAL. (2020). Índice de la Tendencia Laboral de la Pobreza (ITLP). Ciudad de México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.
- Dalhuisen, J. M., Florax, R. J., de Groot, H. L., & Nijkamp, P. (2003). Price and Income Elasticities of Residential Water Demand: A Meta-Analysis. *Land Economics*, LXXIX(2), 292-308.
- de Groot, H., Nijkamp, P., & Dalhuisen, J. (2003). Price and Income Elasticities of Residential Water Demand: A Meta-Analysis. *Land Economics*, 292-308. doi:10.2307/3146872
- de la Luz, V. (21 de Mayo de 2019). Agua de Puebla, la empresa con más quejas de consumidores ante Profeco. El sol de Puebla. Obtenido de <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/agua-de-puebla-la-empresa-con-mas-quejas-de-consumidores-ante-profeco-ricardo-sheffield-3652730.html>
- Diario Cambio. (23 de 12 de 2015). Las 10 noticias más escandalosas de Puebla. Obtenido de <https://www.diariocambio.com.mx/2015/zoon-politikon/item/33420-las-10-noticias-mas-escandalosas-de-puebla>
- DOF. (2016). ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle de Puebla, clave 2104, en el Estado de Puebla, Región Hidrológico-Administrativa Balsas. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- ENIGH. (2018). Encuesta Nacional de Ingreso y Gasto de los Hogares. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/nc/2018/doc/enigh2018\\_ns\\_presentacion\\_resultados.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/nc/2018/doc/enigh2018_ns_presentacion_resultados.pdf)
- ENOE. (2020). Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), población de 15 años y más de edad. Recuperado el 30 de 11 de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/#Tabulados>
- Flores, C. (2000). La guerra del agua en Cochabamba: movimientos sociales y crisis. *Ecología Política*(20), 59-70. Recuperado el 19 de 06 de 2020, de [www.jstor.org/stable/20743108](http://www.jstor.org/stable/20743108)
- Flores, R. Q. (16 de 08 de 2016). Consumo de agua per cápita debe reducirse en Puebla, señala especialista. (J. Zambrano, Entrevistador) Puebla, Puebla, México: e-consulta.
- Foucault, M. (1988). El sujeto y el poder. *Revista Mexicana de Sociología*, 50(3), 3-20.
- García Bello, J. (02 de 12 de 2018). La lucha por la desprivatización del agua en Puebla. *La Jornada*. Obtenido de <https://ecologica.jornada.com.mx/2018/12/02/la-lucha-por-la-desprivatizacion-del-agua-en-puebla-8956.html>
- García Otero, R. (02 de 03 de 2020). Justicia federal declara inconstitucionales las tarifas que aplica Agua de Puebla. *La Jornada de Oriente*. Obtenido de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/justicia-tarifas-agua-de-puebla/>
- Garduño, R. (23 de 05 de 2016). En actos simulados entregaron en Puebla la concesión para servicio de agua potable. Obtenido de <https://www.jornada.com.mx/2016/05/23/politica/006n1pol>
- Gutiérrez, P. (24 de 08 de 2020). Escuelas enfrentan excesivos cobros de Agua de Puebla pese a que están cerradas. *La jornada de Oriente*. Obtenido de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/escuelas-enfrentan-excesivos-cobros-de-agua-de-puebla-pese-a-que-estan-cerradas/>
- Harberger, A. C. (1954). Association Monopoly and Resource Allocation. *The American Economic Review*, XLIV(2), 77-87.
- INEGI. (2010). Cuentame. Agua potable y drenaje. Recuperado el 18 de 06 de 2020, de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- Jouravlev, A. (2001). Regulación de la industria de agua potable. Volumen I: Necesidades de información y regulación estructural. Santiago de Chile: División de Recursos Naturales e Infraestructura CEPAL.
- LAN. (01 de 12 de 1992). Ley de aguas nacionales. México DF.

- LASEP. (28 de Febrero de 1992). Ley de Agua y Saneamiento del Estado de Puebla. (G. d. Puebla, Ed.) Puebla, Puebla, México: Orden Jurídico Poblano.
- Llaven , Y. (02 de Octubre de 2019a). Reforma a la ley de agua busca frenar cobros excesivos de concesiones integrales. La jornada de Oriente. Obtenido de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/reforma-cobros-excesivos-agua/>
- Llaven , Y. (24 de Octubre de 2019b). Concesiones integrales contrató a una tercera empresa para evadir la ley y cortar el servicio de agua. La jornada de Oriente. Obtenido de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/concesiones-evadir-ley/>
- Llaven, Y. (15 de Marzo de 2013). Decenas de piperos se manifestaron vs nueva Ley de Agua del estado. La Jornada de Oriente. Obtenido de [https://www.lajornadadeoriente.com.mx/noticia/puebla/decenas-de-piperos-se-manifestaron-vs-nueva-ley-de-agua-del-estado-\\_id\\_21642.html](https://www.lajornadadeoriente.com.mx/noticia/puebla/decenas-de-piperos-se-manifestaron-vs-nueva-ley-de-agua-del-estado-_id_21642.html)
- Llaven, Y. (01 de Noviembre de 2019c). 2019 fue el año que más violencia ejerció Concesiones Integrales vs los usuarios: ASA. La jornada de Oriente. Obtenido de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/2019-fue-el-ano-que-mas-violencia-ejercicio-concesiones-integrales-vs-los-usuarios-asa/>
- López Zamora, R. (2014). Los servicios de agua potable y saneamiento en la Ciudad de Puebla. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- López, V. (05 de 11 de 2019). CFE y Agua de Puebla encabezan quejas ante Profeco. Milenio. Obtenido de <https://www.milenio.com/politica/comunidad/cfe-agua-puebla-encabezan-quejas-profeco>
- Maas, A., Goemans, C., Manning, D. T., Burkhardt, J., & Arabi, M. (2018). Complements of the house: Estimating demand-side linkages between residential water and electricity. *Water Resources and Economics*, 3-10.
- MAPAS. (2010). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Estructuras Tarifarias. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- Martín, L., & Justo, J. (2015). Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Naciones Unidas. Obtenido de [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37877/S1500220\\_es.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37877/S1500220_es.pdf)
- Massarutto, A. (2007). Water pricing and full cost recovery of water services: economic incentive or instrument of public finance? *Water Policy*(9), 591-613. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/250140557\\_Water\\_pricing\\_and\\_full\\_cost\\_recovery\\_of\\_water\\_services\\_Economic\\_incentive\\_or\\_instrument\\_of\\_public\\_finance](https://www.researchgate.net/publication/250140557_Water_pricing_and_full_cost_recovery_of_water_services_Economic_incentive_or_instrument_of_public_finance)
- Mejía Sánchez, E. (2016). Privatización del agua y su impacto en el desarrollo local. Caso: Nestlé Water Sapi en Tlahuapan, Puebla. 1997-2016. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Moreno Quezada, E. (2020). Agua e inflación en México. Entorno UDLAP(11), 48-61. Obtenido de <https://entorno.udlap.mx/agua-e-inflacion-en-mexico/>
- ONU. (2011). El derecho al agua. Ginebra, Suiza: Alto comisionado de las Naciones Unidas para los derechos humanos.
- Periodico Oficial. (2018). Estructura tarifaria del Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla. Puebla: Periodico Oficial del Estado de Puebla.
- Philps, L. (1988). Price discrimination: A survey of the Theory. *Journal of economic surveys*, II(2), 135-16.
- PIGOO. (2019). Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores. Obtenido de <http://www.pigoo.gob.mx/>
- Porrás Rugerío, J. (27 de 06 de 2019). Privatizar el agua, miseria capitalista II. La Jornada de Oriente. Obtenido de <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/privatizar-el-agua-miseria-capitalista-ii/>
- Puri, R., & Maas, A. (2020). Evaluating the Sensitivity of Residential Water Demand Estimation to Model Specification and Instrument Choices. *Water Resources Research*(56), 1-14.

- Quiroga Glave, M. (2006). Teoría de la discriminación de precios y sus efectos. *Foro Jurídico*(05), 180-190.
- Revollo-Fernández, D., Rodríguez-Tapia, L., & Morales-Novelo, J. A. (2019). Impacto de los subsidios al agua en los hogares pobres de la Ciudad de México. *Gestión y Política Pública*, XXVIII(1), 39-67.
- Rivera, I. (15 de 08 de 2019). Hasta 122% ha aumentado la tarifa del agua en Puebla desde que Moreno Valle concesionó el servicio. *Central*. Obtenido de <https://www.periodicoocentral.mx/2019/gobierno/item/18678-hasta-122-ha-aumentado-la-tarifa-del-agua-en-puebla-desde-que-moreno-valle-concesiono-el-servicio>
- Rojas, O., & Fernández Lomelín, L. (2019). La defensa del territorio y el agua. Un bien común desde la perspectiva maseualmej, Cuetzalan del Progreso Puebla. *Revista de Paz y Conflictos*, 135-154.
- Russell, B. (16 de 10 de 2019). En la Ciudad de México, un mercado negro para la necesidad más básica. *Americas QUARTERLY*. Obtenido de <https://www.americasquarterly.org/article/en-la-ciudad-de-mexico-un-mercado-negro-para-la-necesidad-mas-basica/>
- Salazar Adams, A., & Pineda Pablos, N. (2010). Factores que afectan la demanda de agua para uso doméstico en México. *Región y Sociedad*, XXII(49), 2-15.
- Secretaría de Gobernación. (31 de Diciembre de 2012). *Ley del Agua para el Estado de Puebla*. Ciudad de Puebla, Puebla: Orden Jurídico Poblano.
- SITAP. (2019). Sistema de Información de Tarifas de Agua Potable. Obtenido de <http://187.189.183.90/usodomestico.php>
- Toxqui Furlong, M. (2013). Agua para todos en Puebla: privatización y modernización del servicio, 1855-1883. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2016). Modelación de la variación del consumo de agua potable con métodos estocásticos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(3), 115-133.
- UN-Water. (2015). Decenio internacional para la acción "El agua fuente de vida" 2005-2015. Obtenido de <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml>
- Vargas Castro, D. (2017). Gestión hídrica y análisis de conflictos por agua en Puebla. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- WRI. (09 de 11 de 2020). Water Risk Atlas-AQUEDUCT Beta. Obtenido de [https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=w\\_awr\\_def\\_tot\\_cat&lat=18.45616282504624&lng=-99.87670898437501&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scena](https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=w_awr_def_tot_cat&lat=18.45616282504624&lng=-99.87670898437501&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scena)
- Yepes, G. (2003). Los subsidios cruzados en los servicios de agua potable y saneamiento. Washington, D. C.: Banco Interamericano de Desarrollo.

*Como citar este artículo:*

Vargas Castro, et al., (2021). Discriminación de precios en las tarifas de agua potable en la ciudad de Puebla. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 58-80. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-05



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

## Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe-Argentina

*Implementation of the HydroBID model in Los Padres-Santa Fe-Argentina Basin*



Alejandra Arbuét <sup>1\*</sup>, Graciela Pusineri <sup>1</sup>, Rosana Mazzón <sup>2</sup>, Héctor Hugo Bianchi <sup>2</sup>  
Carlos Scioli <sup>1</sup>, Marta Paris <sup>1</sup>, Juliana Corrales <sup>3</sup>, Mauro Nalesso <sup>4</sup>

Recibido: 11/12/2020

Aceptado: 09/05/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

La parte central de la provincia de Santa Fe (Argentina) es un área de llanuras, con pendientes muy bajas con predominio del movimiento vertical del agua sobre el horizontal. Es el caso de la cuenca del arroyo Los Padres (670 km<sup>2</sup>) donde se implementó el modelo de balance HydroBID para analizar el impacto que generan los cambios en el uso del suelo en el balance hídrico, considerando condiciones hidrometeorológicas históricas y con cambio climático. Se analizó la sensibilidad del modelo considerando 3 escenarios teóricos, con un único uso del suelo en toda la cuenca. Además, se consideró el cambio climático de acuerdo con lo proyectado por KNMI, donde prevé en el periodo 2081-2100 un aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10%. Los valores obtenidos con el HydroBID muestran que en la escorrentía anual acumulada para cada subcuenca se observa un aumento del 18% para el uso tierras agrícolas seca y pastizales y del orden del 26% considerando el cambio climático. Los resultados obtenidos permiten realizar de manera fácil y sencilla los mapas en QGIS, y así representar las variaciones debido al cambio de uso de suelo y a los efectos producidos por cambio climático, dando luz de los lugares donde se deben priorizar medidas de mitigación.

**Palabras clave:** HydroBID, Balance Hídrico, Uso del Suelo, Cambio climático.

### Abstract

*The central part of the province of Santa Fe (Argentina) is a plain area with extremely low slopes and where the vertical movement of water predominates over the horizontal one. This is the case of the Los Padres creek basin (670 km<sup>2</sup>) where the implementation of the HydroBID model was used to analyze the impact generated on the water balance by changes in land use considering the historical hydrometeorological conditions and with climate change. The sensitivity of the model was analyzed considering 3 theoretical scenarios, with a single land use in the entire basin. In addition, climate change was considered in accordance with the projections of the KNMI where it foresees an increase in temperature of 3°C and precipitation of 10% in the period 2081-2100. The values obtained with the HydroBID show that in the accumulated annual runoff for each sub-basin, an increase of 18% is observed for the use of dry agricultural lands and pastures and of the order of 26% considering climate change. The results obtained allow the maps to be made easily and simply in QGIS, and thus represent the variations due to land use change and the effects produced by climate change, highlighting the places where mitigation measures should be prioritized.*

**Keywords:** HydroBID, Water Balance, Land Use, Climate Change.

- 
- 1 Centro de Hidrología y Gestión del Agua (CHyGA, I+D+i) - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral (FICH-UNL), Santa Fe, Argentina. alearbuét@gmail.com, graciwapusineri@yahoo.com.ar, sciolicarlos@gmail.com, parismarta@gmail.com
  - 2 Instituto Nacional del Agua - Subgerencia Centro Regional del Litoral (INA- SCRL), Santa Fe, Argentina. rosanamazzon@yahoo.com.ar, inghbianchi@gmail.com
  - 3 RTI Internacional, Washington, EU. jcorrales@rti.org
  - 4 Centro Soporte HydroBID, Washington, EU. mauron@iadb.org

## 1. INTRODUCCIÓN

### Descripción del problema

Las cuencas del centro y norte de la provincia de Santa Fe (Argentina) tienen una particularidad que las hace diferentes a muchas de las zonas más productivas de Latino América y el Caribe, son cuencas de llanuras, con pendientes muy bajas. Las divisorias de aguas de estas cuencas son en muchos lugares difusas, por lo que la escorrentía superficial se deriva hacia una u otra cuenca. Además, pequeñas modificaciones antrópicas a la topografía (bordos, caminos, etc.) pueden generar cambios sensibles en la dinámica hídrica. En estos sistemas hidrológicos de llanura producto de las bajas pendientes predomina el movimiento vertical del agua sobre los horizontales (evaporación, transpiración e infiltración que –en períodos de balance hídrico positivo- hace ascender la freática hasta la superficie), excepto durante períodos de excedencia hídrica extrema. Por otra parte, los cambios de cobertura y uso del suelo son reconocidos como una de las principales causas de deterioro ambiental, con un avance de la agricultura sobre las tierras ocupadas por la ganadería y bosques nativos. El uso del suelo ha disminuido la capacidad de infiltración haciendo aún más necesario poder cuantificar qué pasa con el agua que está en superficie encharcando, anegando e inundando. Además, las profundidades desde las que las raíces extraen agua han cambiado: la vegetación natural superaba los 5 m; las pasturas pluri- anuales como la alfalfa extrae desde los 3 a 4 m, pero los cultivos anuales no llegan a los 2 m y con compactación del suelo. Más allá de las cuestiones geomorfológicas que naturalmente definen la dinámica hídrica de la cuenca, es importante resaltar a la acción antrópica

como característica común y factor determinante en el comportamiento de los escurrimientos. La región se presenta altamente intervenida por la mano del hombre, esto se ve reflejado por la presencia de rutas, caminos, terraplenes de defensas y canales que interconectan artificialmente zonas no conectadas naturalmente. Una cuenca en la región que representa las características y problemáticas mencionadas es la del A° Los Padres, la cual fue elegida para la implementación del modelo HydroBID (Moreda, et al, 2017). El HydroBID se aplica a unidades de cuencas pequeñas, considerando los usos de tierras y las condiciones del suelo. Utiliza la estructura de datos hidrológicos denominada *Analytical Hydrographic Dataset* (AHD) que contiene información de las cuencas y red de drenaje de la región Latino América y el Caribe (LAC), y además una base de datos (BD) de uso y tipo de suelos (argentina.sqlite). La Figura 1 es el esquema de los flujos y almacenamientos diarios del HydroBID en una cuenca. Para una lluvia (R) el modelo calcula la escorrentía (Q) aplicando método del Numero de Curva, la evaporación real (E) a partir de la humedad disponible y la evapotranspiración potencial (se calcula en función de la temperatura diaria y un factor de cobertura que depende el uso del suelo y condiciones de la cobertura). La percolación (P) ocurre cuando el agua en la zona no saturada sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo. El flujo base (G) y la percolación profunda (D) se calculan en función de las constantes de recesión de agua subterránea y de percolación respectivamente. Los volúmenes de agua almacenada en la capa no saturada (U) y saturada (S), se calculan por balance diario, considerando la situación del día previo y flujos del día.

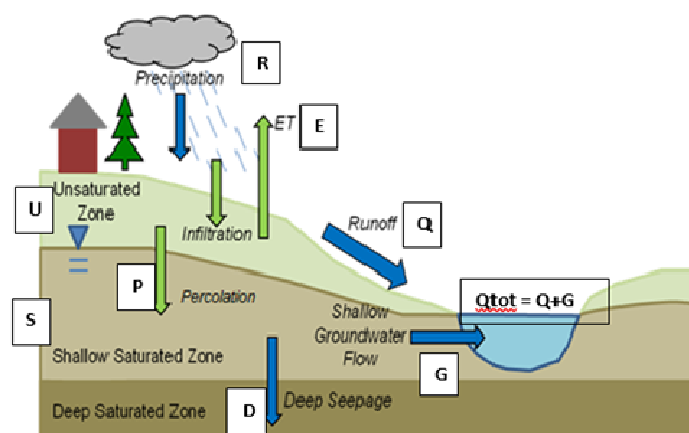


Figura 1. Esquema de flujos y almacenamientos del HydroBID

La implementación de un modelo de estas características, en un sistema tan complejo como son los sistemas de llanura es un desafío, ya que para la representación hidrológica de estos sistemas se recomienda la aplicación de modelos basados físicamente y distribuidos espacialmente. Por otra parte, el aporte de un modelo de simulación como HydroBID hace posible predecir de manera sencilla qué podría ocurrir si se realizan determinados cambios futuros y es un poderoso medio para promover la interdisciplinariedad ya que requiere de la intervención ordenada de las disciplinas, organizando el aporte de cada una. Además, puede ser de mucha ayuda para promover la articulación institucional tanto del ámbito público como del privado.

### 1.2 Objetivo

El objetivo de la modelación con el HydroBID es analizar el impacto en el balance hídrico que generan los cambios en el uso del suelo considerando condiciones hidrometeorológicas históricas y posteriormente con cambio climático, en la cuenca del A Los Padres (Santa Fe-Argentina). Se pretende, además, evaluar el desempeño del modelo para representar el proceso lluvia-escorrentía en sistemas hidrológicos de llanuras.

### 1.3 Descripción de la cuenca

En la cuenca del A Los Padres, elegida para la implementación del modelo, se trata de una cuenca no aforada, pues no se dispone de estaciones con registro sistemático de caudales que puedan ser utilizados para la calibración del mismo, situación muy común en la región. Por este motivo se adoptó para la calibración el criterio de contrastar los valores simulados por HydroBID con los obtenidos en el Plan Director de la Provincia de Santa Fe. Los mismos son el resultado de una simulación hidrológica realizada a nivel de planificación, con el modelo HEC-HMS desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del Cuerpo de Ingenieros de los E.E.U.U., que se corrió con los parámetros y condiciones de uso actual de suelo y con los relevamientos topográficos particulares de los distintos puntos de control.

La cuenca tiene una superficie de 660 km<sup>2</sup>, se divide en la subcuenca A Los Troncos de 420 km<sup>2</sup> y subcuenca Cañada Malaquías de 250 km<sup>2</sup>. La cota máxima es de 52.5 m y en la salida 12.5 m, referida al cero del Instituto Geográfico Nacional (IGN), lo

que da una pendiente media de la cuenca de 1m/km. Las siete localidades ubicadas en la cuenca son: Las Tunas, San Jerónimo Norte, San Carlos Norte, San Carlos Centro, San Carlos Sur, San Agustín y Matilde, que totalizan unos 30 mil habitantes.

En la figura 2, se puede observar la red hidrográfica-hidráulica, los bajos donde se acumula el agua en épocas de lluvia y la delimitación oficial de la cuenca de estudio. El desarrollo de la red de canales está conformado por el A Los Troncos, (cauce principal 27 km) y la Cañada Malaquías (canalizada 12 km) más 57 canales, que totalizan una longitud de 180 km.

Desde el punto de su comportamiento hidrológico -hidráulico se puede diferenciar dos zonas/tramos, un tramo superior donde se encuentra la cabecera de la cuenca, tienen como límite inferior la Autovía N° 19, y se caracterizan por no tener un canal o cauce definido de jerarquía, sino que presenta bajos relativos y una serie de canales de distinto orden que tratan de conducir los excesos hacia dicha ruta. En esta se producen trasvases desde y hacia la cuenca. Y un tramo inferior que se desarrolla hacia el sur de la Autovía N° 19. En este tramo Los Troncos presenta un cauce bien definido, en cambio en la subcuenca Malaquías se desarrolla una cañada que está localizada inmediatamente al oeste de la autopista y dada la escasa pendiente de esta zona, para situaciones de excesos, se producen desbordes laterales que son captados por algunas de las alcantarillas de drenaje de la autopista.

El puente ubicado en la sección de control del A Los Padres en la autopista Rosario - Santa Fe, tiene una capacidad máxima en el orden de los 250 m<sup>3</sup>/s.

La temperatura media anual en la zona de estudio es de 18°C, variando en los meses más fríos de invierno es de 11°C y en los meses más cálidos 26°C. En verano alcanzan como máximo los 38°C y en invierno, las temperaturas alcanzan como mínimo los -1°C.

La precipitación media anual varía entre 900 mm y 1,200 mm, pero han ocurrido años muy secos con valores de 600mm (2008). Los mínimos promedios mensuales se registran en julio (invierno), con valores de 23 mm y los máximos en marzo, con valores que pueden superar los 150 mm, por eso el año hidrológico en esta zona es interanual, inicia en setiembre y finaliza en agosto. Se han registrado valores máximos de precipitaciones diarias de 195

mm (25/abril/1999) y de 300 mm acumulado en dos días (marzo/2007). En la estación de Rafaela se registraron en los meses de febrero, marzo y abril del 2007 un acumulado de 735 mm.

La evapotranspiración varía entre 500 y 900 mm, según la ocupación que se haga del suelo y con qué cultivos. Teniendo en cuenta las disponibilidades agroclimáticas de la cuenca se puede cultivar trigo y maíz con muy poca deficiencia de agua.

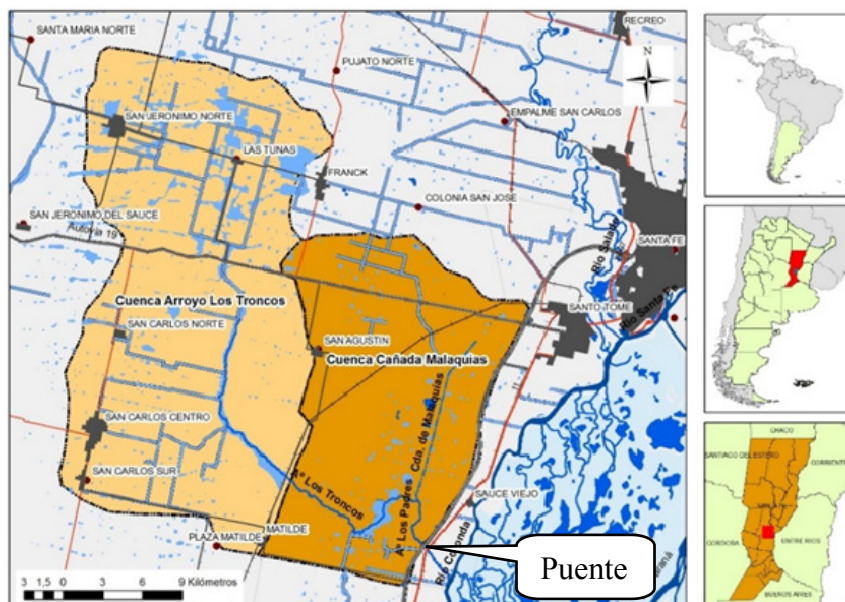


Figura 2. Ubicación de la cuenca del A Los Padres

Según la información suministra por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) a escala 1:500,000, la cuenca cubre un único suelo tipo “Franco limoso”, lo que significa un suelo tipo B de acuerdo con la clasificación hidrológica del Servicio de Conservación de Suelo (SCS) de EEUU, con capacidad de infiltración moderada entre 38 y 76 mm/h. El sistema productivo está conformado por actividades agrícolas-ganaderas, con algunos tambos. La ocupación del suelo puede variar en: un solo cultivo por año, dos cultivos por año (soja/trigo, maíz/trigo) o una pastura plurianual. Esto hace que en zona agrícolas los valores de Curva Número (CN) varían según el mes o época del año, cuando la superficie presenta suelos descubiertos los valores son mayores y cuando la superficie se encuentra cubierta por cultivos, los valores del CN son más bajos.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Representación topológica del área de estudio - AHD Revisada

La *Analytical Hydrographic Dataset* (AHD) (Rineer et al, 2014) es una base de datos espacialmente explícita de aguas superficiales. Es un marco para la parametrización de modelos en una manera consistente, que provee la conectividad del flujo aguas arriba/aguas abajo necesarias para dichos modelos, y la data necesaria para mostrar los resultados en forma gráfica.

Para acceder a la AHD de Argentina, se debe utilizar el software libre QGIS donde se instala la herramienta AHD Tools (Nalesso & Coli, 2017). Esta base contiene los archivos de la delimitación de cuencas y cauces (formato shapefile) y la base de datos con la conectividad entre cuencas y los cauces (formato dbf). Allí se identificó el COMID 316421700 correspondiente a la cuenca de Los Padres.

En la AHD inicialmente suministrada por RTI se observaron algunos errores:

- la red de drenaje correspondiente al río Coronda tiene sentido de escurrimiento Sur-Norte, cuando debe ser Norte- Sur.

- las subcuencas con COMID 316398200 y 316414600 deben aportar a la 316421700, y lo hacen directamente hacia el río Coronda, no existiendo la cañada Malaquías.

Para solucionar estos problemas detectados, se recomendó la modificación de la AHD original, de manera que refleje la conectividad de las cuencas y los cauces. El resultado de este trabajo, realizado por los responsables de RTI, es una nueva AHD\_Revised, en la que se modificaron el archivo de ríos (Flowlines\_Argentina.shp) y la conectividad

(AHDFlow.dbf), manteniéndose igual el archivo de las cuencas. Además de la nuevo BD “argentina\_revised.sqlite”.

En la figura 3 se comparan las cuencas que drenan hacia el COMID 316421700 de AHD original y la revisada con la nueva conectividad. En esta última se identifica una superficie de 729 km<sup>2</sup> para la cuenca total, valor que supera a la cuenca oficial realizada por el INA-SCRL de 660 km<sup>2</sup> en 69 km<sup>2</sup>, lo que representa una diferencia del 10%.

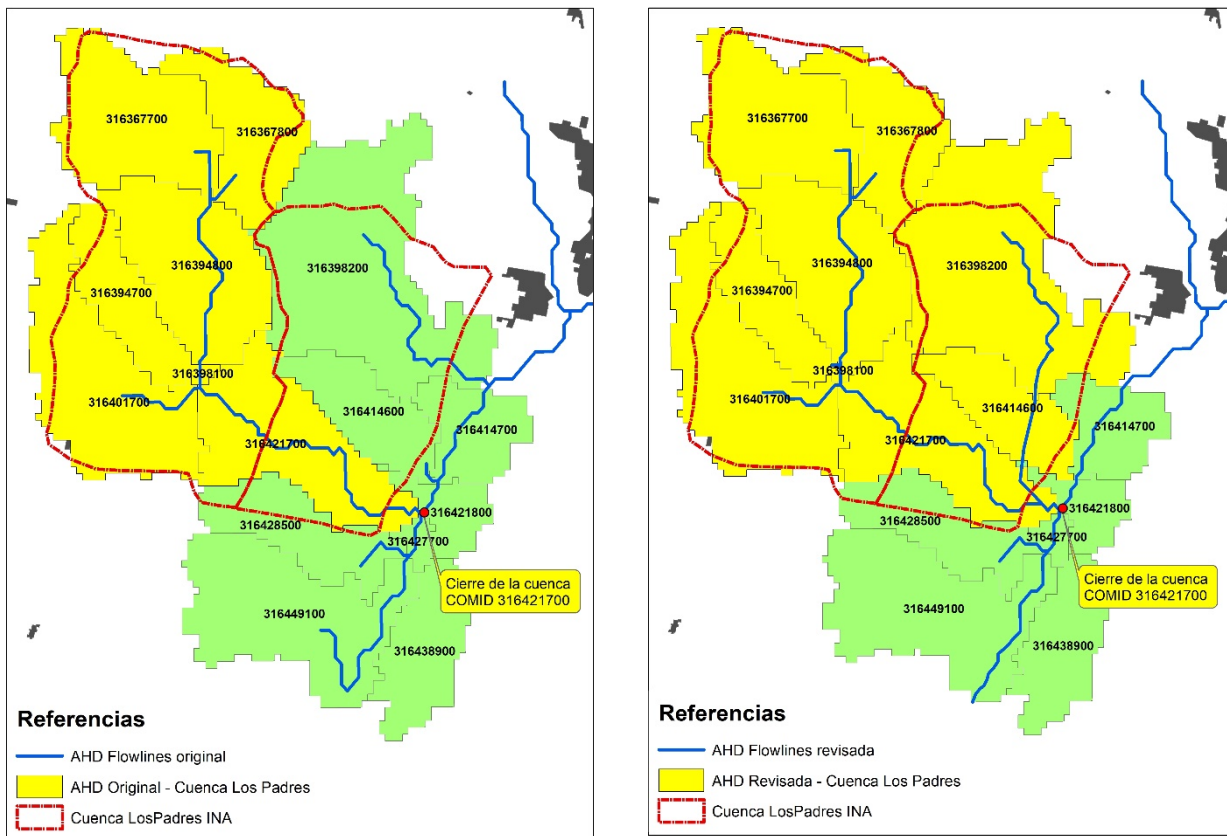


Figura 3. Comparación de AHD original (a) y revisado (b), con cuenca oficial del INA

## 2.2 Preparación de datos

### 2.2.1 Clima

El modelo HydroBID requiere como datos de entrada series diarias de precipitación y temperatura media para cada subcuenca. Esas series las calcula a partir de series medidas en determinadas estaciones. Existen en la zona información hidrometeorológica proveniente de diversas fuentes, para este estudio se utilizaron los datos históricos observados en tres estaciones, seleccionadas considerando su ubicación

geográfica, la extensión de los registros, la cantidad y la calidad de los datos.

- “Sauce Viejo Aero” del Servicio Meteorológica Nacional (SMN), a 3 km de distancia hacia el Este
- “Santa Fe CIM” de la Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas (FICH), a 12 km hacia el Este
- “Rafaela INTA” del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), a 50 km de distancia hacia el Noroeste

Obtenidas las series diarias de los datos observados en las estaciones seleccionadas, se realizó un análisis exploratorio de los datos. Así se identificó que la estación Sauce Viejo cuenta con registros en el periodo 1958- 2017, la estación Rafaela 1961-2017 y la estación Santa Fe CIM entre los años 1989-2018.

Las series de precipitaciones diarias, así como las de temperaturas diarias de las estaciones Rafaela INTA y Sauce Viejo Aero estaban disponibles completas. La serie de datos de precipitación de la estación Santa Fe CIM, presenta datos ausentes entre los años 2009 y 2017, por ello se realizó el relleno de los datos faltantes, con el fin de completar el periodo de estudio común 1989-2016.

A partir de los valores completos de cada estación se generó la figura 4 que muestra la variación de la precipitación media mensual el período 1989-2016, con un comportamiento similar en las tres estaciones consideradas. Se observa como los máximos de precipitación se registran en los meses de marzo y diciembre, y las menores precipitaciones en los meses de invierno.

El promedio anual de precipitación para la estación Sauce Viejo es de 1,072 mm, para la estación Rafaela INTA es de 1,016 mm, mientras que 1127 mm para Santa Fe CIM.

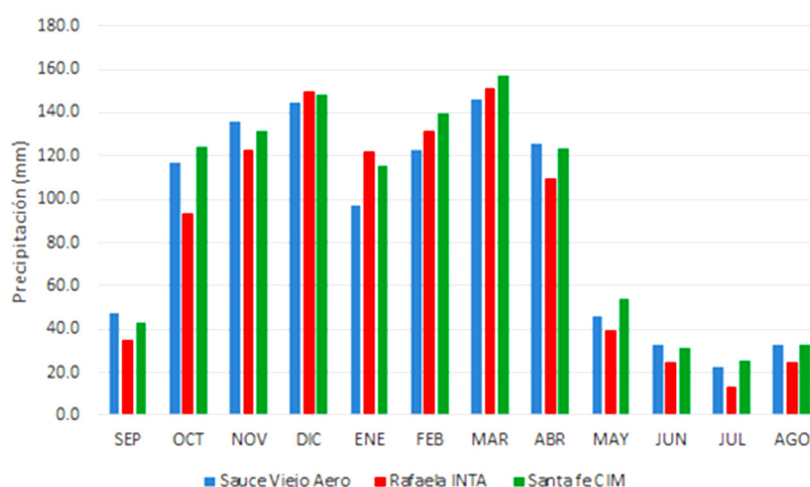


Figura 4. Variación de la precipitación media mensual en el período 1989-2016

En la variación de la temperatura media mensual para el período 1989-2016, también se observa de modo general un comportamiento estacional regular. El ciclo medio anual promedio sobre el área en estudio muestra un rango térmico de 15.0 °C, con el máximo valor en enero (26.5 °C) y el mínimo en julio (11.5 °C). Una vez definidas las estaciones con las que se trabajó y realizado el relleno de las series diarias de precipitación (cm) y temperatura (°C), se definió el periodo de estudio y se generaron los archivos de acuerdo con las especificaciones establecidas (Nalesso & Coli, 2017).

Todas las series tienen como fecha de inicio el 01/01/1989 y finalizan el 31/12/2016, lo que da un total de 28 años de registros. Las series de datos meteorológicos diarios de cada estación se interpolan espacialmente para obtener las series promedio para cada cuenca, a través de la

herramienta de Interpolación de Datos Climáticos (*Climate Data Interpolation Tool* - CDIT), que aplica la técnica conocida como la Distancia Inversa Ponderada (IDW) utilizando el centroide de las cuencas como el punto de predicción. La distancia entre el centroide y las estaciones se calcula por medio de las coordenadas. Utilizando la herramienta CDIT de la interfaz del HydroBID, donde se ingresan los archivos de clima para el período de estudio, se generó la nueva tabla llamada “Clima 1989\_2016LP” en la base de datos (BD) “argentina\_revised.sqlite”,

### 2.2.2 Tipo y uso del suelo

En la tabla “catchment\_nlcd\_soils” de la BD “argentina\_revised.sqlite”, suministrada por RTI, se almacenan los parámetros de tipo y uso de suelo de cada subcuenca, identificada por su COMID.

Realizando un filtro para las nueve subcuencas que se identificaron en la zona de estudio, se obtuvieron los parámetros de tipo y uso que contiene la tabla `catchment_nlcd_soils`.

En la tabla 1 se puede observar los seis usos del suelo identificados, con los respectivos valores de CN y las sumas de las superficies calculadas en porcentaje respecto al total de la cuenca. La mayor superficie le corresponde al uso 2-Tierras agrícolas secas y

pastizales, con casi un 60% de la superficie de la cuenca y le sigue el 5-Agricultura/Pastizales con un 27%. El valor ponderado arealmente de CN es de 71. Esta será la situación de uso de suelo que se considerará como “original” en este trabajo. Se observa que el tipo hidrológico de suelo, en todos los casos es B, coincidiendo con el suelo determinado por el INTA.

Tabla 1. Resumen de las superficies para cada uso de suelo en la cuenca Los Padres

nlcd_id	Uso de suelo	Valor Curva Numero (CN)	Grupo Hidrológico	Área (%)
1	Urbano	88	B	0.41
2	Tierras agrícolas secas y pastizales	75	B	59.84
5	Agricultura/Pastizales	64	B	27.15
6	Agricultura/Bosques claros	64	B	6.74
7	Pastizales	70	B	5.81
	Humedales arbolados	70	B	0.04

Como no se dispone de una capa de usos de suelo de la cuenca, se analizó la sensibilidad del modelo mediante tres escenarios teóricos de uso del suelo. Se utilizó la herramienta de Parametrización, para crear nuevas tablas, que se guardan en el BD `argentina_revised.sqlite`.

Con esta herramienta los valores de CN para cada COMID se asignan usando los archivos de entrada de cobertura vegetal y tipo de suelo definidos por el usuario.

En los tres escenarios teóricos analizados se consideró en toda el área de estudio un mismo tipo de uso del suelo:

- Escenario 1: 5 -Agricultura/Pastizales (CN 64)
- Escenario 2: 17- Humedales (CN 70)
- Escenario 3: 2 -Tierras agrícolas seca y pastizales (CN 75)

Cada caso fue representado por una capa que contiene un único polígono, con el valor de tipo de uso que corresponde según la tabla 1.

### 2.3 Aplicación práctica del modelo

Como se ha mencionado anteriormente, dado que no existen registros de caudales observados, se compararon los resultados del HydroBID, solo a los efectos de aprender el uso de dicho modelo, con los resultados obtenidos con el modelo HEC-HMS en la

modelación realizada en el marco del Plan Director de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe (Plan Director).

Esta comparación no pretende ser una calibración sino solamente contar con una serie de caudales/volúmenes simulados con otro modelo con el fin de aprender la metodología utilizada por HydroBID. En la modelación con el HEC-HMS se consideró la discretización en 4 subcuencas, los datos físicos y parámetros fueron los utilizados en el Plan Director, actualizándose solo la serie de precipitación de la estación Sauce Viejo Aero, con el fin de que coincida el período de simulación en ambos modelos.

#### 2.3.1 Descripción de modelo antecedente HEC-HMS

Ante la inexistencia de series de caudales observados, se tomaron como válidos los parámetros que se utilizaron para dos cuencas cercanas que si cuentan con aforos y pertenecen a la misma región hídrica.

Estas son Cuenca del A Colastiné y Cuenca A Carrizales. Se utilizó la cuenca oficial del Plan Director con 659 Km<sup>2</sup> dividida en 4 subcuencas, teniendo como punto de cierre la subcuenca del A Los Troncos el puente de la ruta 50-S y la cuenca total el puente sobre la autopista Rosario-Santa Fe. En la tabla 2 se puede observar la discretización de las subcuencas utilizadas, que difieren en un 10% con la superficie de AHD (729 km<sup>2</sup>).

Tabla 2. Superficies de las subcuencas utilizadas en el modelo HEC-HMS

Cuenca	Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Long. cauce (km)	Cota (m)		Pendiente
				A Arriba	a abajo	
Los Troncos	L1	167.3	2.9	35.33	33.8	0.00054
	L2	241.8	17.6	33.80	20.1	0.00078
Malaquías	ML1	88.3	5.1	25.69	13.58	0.00917
	ML2	161.3	13.8	13.59	10.21	0.00024

El puente sobre la ruta 50-S tiene una capacidad de conducción aproximada es de 110 m<sup>3</sup>/s y el puente sobre la autopista Rosario-Santa Fe tiene una capacidad aproximada es de 250 m<sup>3</sup>/s.

Los sub - modelos utilizados en el proyecto son: Precipitación Efectiva, Método del Hidrograma Sintético de Clark (para la propagación en cuenca), Método de Muskingum-Cunge (para la propagación en cauce) y también se modeló la influencia de los principales puentes sobre algunas rutas utilizando embalses con reservorios.

El modelo continuo de humedad del suelo (SMA), simula el movimiento del agua a través de distintos niveles de almacenamiento: en la cobertura vegetal, en la superficie del suelo, en el perfil de suelo y de agua subterránea. Conocida la precipitación y la evapotranspiración potencial, el modelo estima el escurrimiento superficial, el flujo subterráneo y la percolación. Este modelo permite simular la respuesta de la cuenca con base de tiempo continuo, en periodos inter-lluviosos, por este motivo se descartó utilizar el método del CN.

Se utilizó la serie de precipitación diaria y la evaporación media mensual como datos de entrada al modelo, correspondiente a la estación Sauce Viejo Aero. Clark deriva su Hidrograma Unitario Sintético representando dos procesos críticos en la transformación del exceso de la precipitación en escurrimiento: proceso de traslación pura seguido de un proceso de atenuación. Si bien ambos procesos se manifiestan en forma conjunta, Clark los considera separados, es decir, primero realiza la traslación del flujo producido por una lluvia neta unitaria hasta la sección de control y posteriormente incorpora la atenuación mediante la propagación de dicho hidrograma a través de un elemento ficticio de almacenamiento lineal ubicado a la salida de la cuenca. El método de Clark utiliza dos parámetros para caracterizar el hidrograma unitario: el tiempo de concentración Tc y el coeficiente de almacenamiento R. El tiempo de concentración Tc es el parámetro utilizado habitualmente para caracterizar la respuesta de una cuenca ante episodios aislados de lluvia. El

modelo de Muskingum Cunge propone la obtención de parámetros en función de las características geométricas del canal. Las dimensiones de los canales utilizados son los naturales y no se consideraron los trasvases desde y hacia la cuenca de Los Padres.

Los embalses son un tipo de elemento que recibe uno o varios flujos entrantes, procedentes de otros elementos y proporciona como resultado del cálculo un único flujo saliente. Se utiliza para poder representar fenómenos de laminación de avenidas en lagos y embalses. Este método se utilizó para representar el efecto de regulación que producen algunos puentes ubicados sobre las rutas principales. En el caso del A Los Troncos, el puente del ferrocarril junto con el puente de la ruta 50-S, producen un amortiguamiento de los caudales picos, este efecto de laminación se ve acentuado aguas abajo de dichos puentes por efecto de la topografía casi plana, hasta el cruce del A Los Padres con la autopista Rosario - Santa Fe, punto de control final de la modelación.

Se obtuvieron así los caudales diarios en la sección de control para la serie simulada (1989 - 2016), aplicando el modelo HEC-HMS considerando y sin considerar el efecto regulador de los puentes existentes. Estos resultados no contaron con un proceso de calibración, pero se consideran aceptables en función de la comparación con los resultados obtenidos en dos cuencas calibradas cercanas, pertenecientes a la misma región, y con las características topográficas similares.

### 2.3.2 Aplicación del modelo HydroBID

Una vez que se ha completado la BD argentina\_revised.sqlite, con las tablas de datos climáticos interpolados y las tablas de coberturas de suelo, se realizaron las corridas del modelo HydroBID. Luego en el proceso de comparación se ajustaron los parámetros del modelo, para representar de manera adecuada los caudales obtenidos por el modelo HEC-HMS. En la tabla 3 se presentan los parámetros finales obtenidos.



Tabla 3. Valores de los parámetros finales

Parámetro	Tipo	Valor
Comienzo de la temporada de cultivo	Valor unico	1
Final de la temporada de cultivo	Valor unico	365
Numero de Curva (CN)	Multiplicador	0.88
Contenido Disponible de Agua (CDA)	Multiplicador	0.85
Coefficiente de Recesion (r)	Valor unico	0.007
Coefficiente de Percolacion (s)	Valor unico	0.001

Para lograr un mejor ajuste se debieron afectar los parámetros del CN y CDA por un coeficiente menor a 1, que produce una reducción de dichos valores iniciales. El valor de CN se afectó por un coeficiente igual a 0.88, reduciendo el valor aproximadamente un 12 %. Esta variación coincide con resultados de estudios locales que determinaron que valor de CN obtenido de tablas se ve disminuido un 20 % en regiones con poca pendiente. Es decir, la poca pendiente genera una disminución de la escorrentía superficial y favorece el movimiento vertical del agua, aumentando la infiltración.

En total se realizaron ocho corridas porque son cuatro tablas con diferentes usos del suelo (valores de CN) y dos series de caudales modelados, obtenidos como salidas de la aplicación del HEC-HMS, con y sin puentes. Las cuatro tablas utilizadas son: *catchment\_nlcd\_soils* (Original), Escenario 1 (5-Agricultura/Pastizales), Escenario 2 (17-Humedales), Escenario 3 (2-Tierras agrícolas seca y pastizales).

Luego se realizó una corrida considerando el cambio climático de acuerdo a lo proyectado por el Atlas del cambio climático de KNMI (KNMI, 2020) para Argentina y en particular el área de estudio, donde

prevé para el periodo 2081-2100 un aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10% (multiplicador 1.1), para la condición original de uso del suelo.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caudales diarios

HydroBID provee diferentes opciones para evaluar su desempeño en cada corrida. El hidrograma que muestra la variabilidad en el tiempo de alguna información hidrológica, por ejemplo el caudal diario en toda la serie temporal, y en este caso permite comparar los caudales pico simulados con HydroBID con los simulados con HEC-HMS. En la tabla 4 se pueden ver algunos parámetros de los resultados obtenidos con el modelo HydroBID, utilizando las diferentes tablas de la BD *argentina\_revised.sqlite*, que hacen variar el valor del CN promedio de la cuenca y considerando dos series de caudales simulados, con y sin puentes. El valor (\*) corresponde al promedio ponderado arealmente. Donde QMHMS es el caudal máximo simulado con el HEC-HMS y QMHydro el caudal máximo simulado con el HydroBID.

Tabla 4. Resultados de las distintas corridas del HydroBID para la cuenca A Los Padres

Situación mod. HMS	Parametrización	CN	CN calibrado (CN *0.88)	QMMS	QMHydro
				m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
Con Puente	Original	71(*)	62.5	236	1,010
Sin Puente	Original	71(*)	62.5	551	1,010
Con Puente	Agricultura/ pastizales	64	56.3	236	916
Sin Puente	Agricultura/ pastizales	64	56.3	551	916
Con Puente	Humedales	70	61.6	236	1,003
Sin Puente	Humedales	70	61.6	551	1,003
Con Puente	Tierras agrícolas secas y pastizales	75	66.0	236	1,071
Sin Puente	Tierras agrícolas secas y pastizales	75	66.0	551	1,071

Si bien los volúmenes calculados con ambos modelos son parecidos, los caudales máximos tienen una gran diferencia, especialmente en los días donde se registraron eventos extremos. Comparando los valores de caudales máximos obtenidos en la modelación del HEC-HMS considerando la existencia de los puentes es del orden de los 240 m<sup>3</sup>/s, con los valores de caudales máximos obtenidos con el HydroBID que varían entre los 920 y 1,010 m<sup>3</sup>/s, se observa que es el HydroBID valores cuatro veces mayor. Como se ha mencionado, la capacidad máxima del puente ubicado en la autopista es de 250 m<sup>3</sup>/s y nunca fue sobrepasado por una crecida.

No se registran diferencias sustanciales en los caudales máximos en los diferentes escenarios de uso de suelo aplicados.

### 3.2 Balances de agua

El HydroBID genera como resultados tablas con los valores diarios de cada parámetro del balance

hidrológico. A partir de los valores diarios se calcularon los acumulados por mes y para cada año, para la condición de uso del suelo original. A partir de los valores anuales para cada uno de los parámetros del balance, obtenidos con la suma de los valores mensuales de toda la serie analizada, se calcularon los estadísticos (promedio, máximo y mínimo) que se observan en la tabla 5.

Analizando la tabla 5 se puede verificar lo dicho en la introducción, que en estos sistemas hidrológicos de llanura predomina el movimiento vertical del agua (evaporación, transpiración e infiltración) sobre los horizontales.

Además, se calcularon para los valores mensuales, promedio de toda la serie, los estadísticos calculados para la serie 1990 – 2016, que se observan en la tabla 6.

Tabla 5. Estadísticos del balance anual (1990-2016)

Estadístico anual	R Precipitación (mm)	Q Escorrentía (mm)	E Evapotrans. (mm)	P Percolac. (mm)	D Percolac. Profunda (mm)	G Descargas de Aguas Subte. (mm)	U Almacenam. No saturado (mm)	S Almacenam saturado (mm)
Promedio	1,088.8	94.8	844.2	145.7	17.8	125.2	24,174.2	17,897.6
Máximo	1,562.2	278.6	959.1	369.2	54.5	383.6	33,883.5	54,723.4
Mínimo	626.2	12.0	628.7	0.0	0.1	0.6	5,151.1	86.0

Tabla 6. Estadísticos del balance mensual (1990-2016)

	Estadístico mensual	Total	Máximo	Mínimo
R	Precipitación (mm)	1,088.10	153.5	22.9
Q	Escorrentía (mm)	94.6	23.1	0
E	Evapotranspiración (mm)	845.1	125.2	32.5
P	Percolación (mm)	145	34.8	0.2
D	Percolación Profunda (mm)	17.1	2.2	1
G	Descargas de Aguas Subterránea (mm)	124.8	15.9	7.1
U	Almacenamiento no saturado (mm)	24,147.30	2,821.50	1,311.30
S	Almacenamiento saturado (mm)	17,846.90	2,259.70	1,007.30

Para una mejor visualización de la variación anual de los cuatro parámetros principales (precipitación, escorrentía, evaporación y percolación) en el periodo 1990-2016, se elaboró la figura 5. Allí se observa que los valores de precipitación obtenidos en el balance anual varían entre un mínimo de 630 mm para el año

2008 hasta un máximo de 1,562 mm para el año 2000. En la evolución de la evapotranspiración anual se observan años donde se superan los valores de precipitación, como ocurrió en el 2008, cuando se registró la peor sequía de los últimos 20 años, generado pérdidas millonarias en la región. El valor

promedio calculado para toda la serie (844 mm) es muy similar a los valores registrados en la región (900 mm), siendo el 77% de la precipitación. La escorrentía anual promedio es de 95 mm (8% de la precipitación), registrándose los máximos en los años 2000 y 2007, ocasión en que se registraron las mayores precipitaciones. Con respecto a la percolación anual los valores varían entre 370 mm y

0 mm, con un promedio de 146 mm (13% de la precipitación).

Para analizar la variación en el año hidrológico de los valores promedios se elaboraron las figuras 6 y 7 para el caso del año 2007, por ser un año atípico situación de exceso hídrico con una precipitación anual de 1,311 mm.

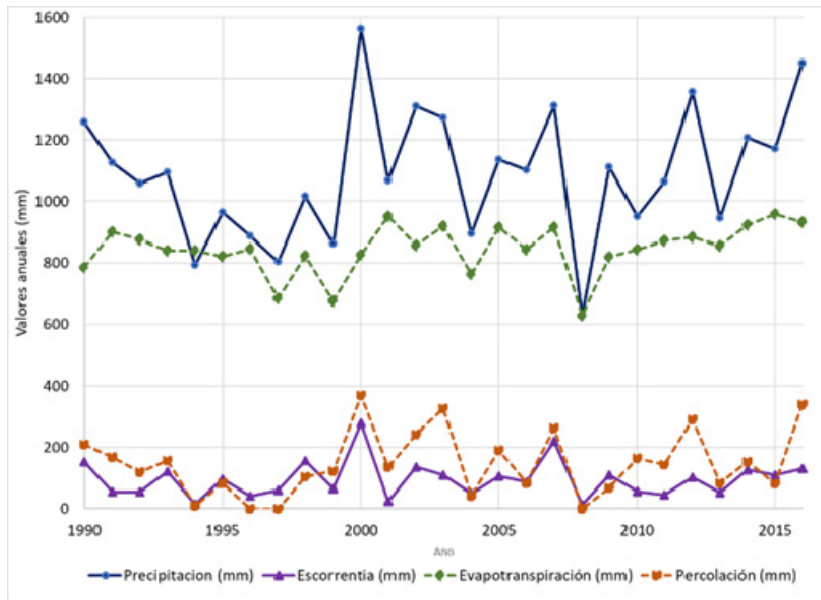


Figura 5. Variación anual de precipitación, escorrentía, evaporación y percolación, resultado del HydroBID

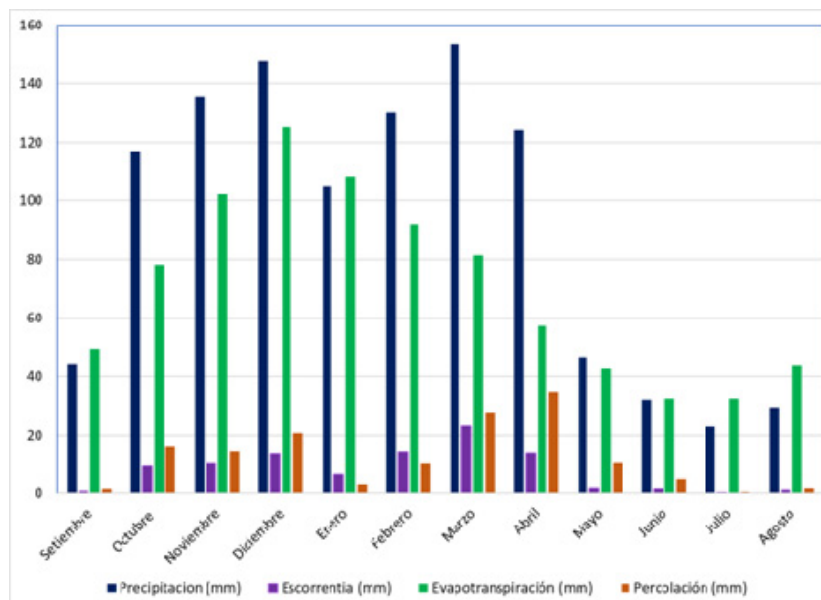


Figura 6. Variación mensual de precipitación, escorrentía, evaporación y percolación profundos promedios, resultado del HydroBID (1990-2016)

En la figura 6 se puede observar que las mayores precipitaciones mensuales se dan en marzo y diciembre (verano), superando los 140 mm y en julio y agosto (invierno) los menores valores que son de 30 mm. Además, se observa claramente como en varios meses la evapotranspiración supera a la precipitación y la escorrentía es casi nula (setiembre, enero, junio, julio y agosto). También se observa como en la mayoría de los meses (excepto enero y febrero) la percolación supera a la escorrentía, llegando a triplicarla.

En la figura 7 se puede observar el evento de lluvia extremo que ocurrió en marzo de 550 mm, superando ampliamente el valor promedio para ese mes de 153 mm. Además, se puede ver que en los meses anteriores también habían ocurrido lluvias importantes, lo que provocó el anegamiento de muchos campos y las inundaciones de varias ciudades.

Cabe resaltar los valores de la escorrentía y percolación que llegaron a superar los 200 mm en marzo, mucho más elevados a los valores promedios para ese mes, que son del orden de los 25 mm.

En las figuras 8 y figura 9 se pueden observar el esquema del balance con los valores de marzo/1993 que fue un año promedio y marzo/2007, situación de

exceso hídrico, con los valores obtenidos con el HydroBID y HEC-HMS.

En el balance del mes de marzo del 1993, considerado como un año promedio (precipitación anual 1095 mm), se puede observar que la precipitación es menor a la evapotranspiración y que tanto la percolación como la escorrentía son nulas. El aporte a los cauces se debe a la descarga del flujo base.

En el balance de marzo del 2007, considerado como un año de exceso (precipitación anual 1,311 mm), se puede observar el elevado valor de la precipitación (567 mm), y como aumentaron los valores percolación y escorrentía con respecto a los valores promedios, cada variable es del orden del 36% de la precipitación. El aporte a los cauces se debe fundamentalmente al aporte de la escorrentía y en menor medida a la descarga del flujo base. La percolación es elevada llegando casi a igualar la escorrentía. De la comparación entre los resultados obtenidos con los dos modelos se puede observar que los valores de la Evaporación del HydroBID son mayores a los del HMS y en el caso de marzo/2007 el flujo base es mucho mayor en el HMS, seis veces mayor.

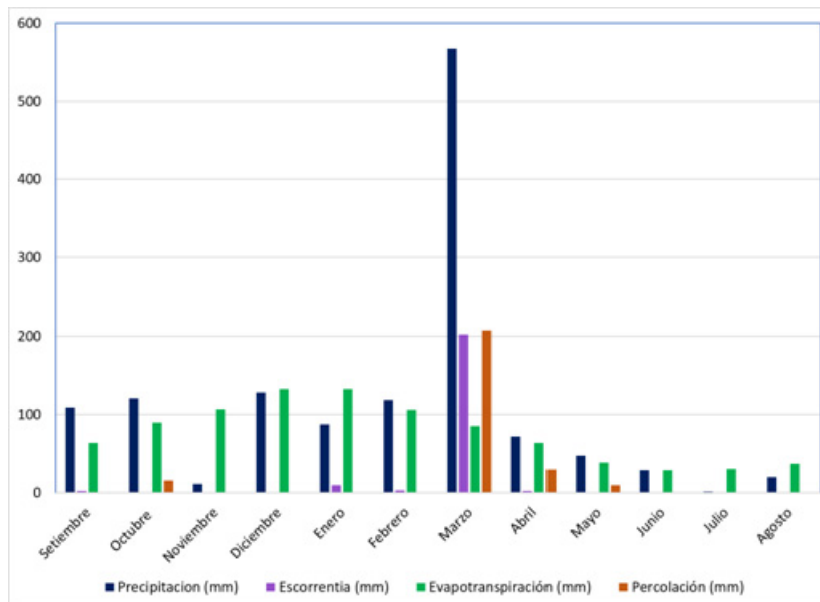


Figura 7. Variación mensual de precipitación, escorrentía, evaporación y percolación profunda para el año 2007, resultado del HydroBID

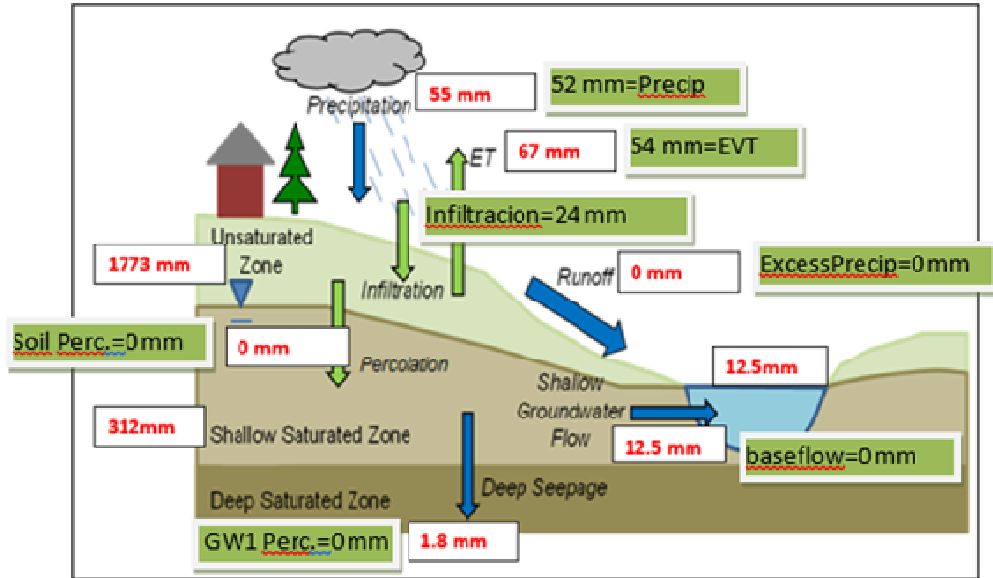


Figura 8. Balance para el mes de marzo-1993 (año promedio), resultados de HydroBID (rojo) y HEC-HMS (verde)

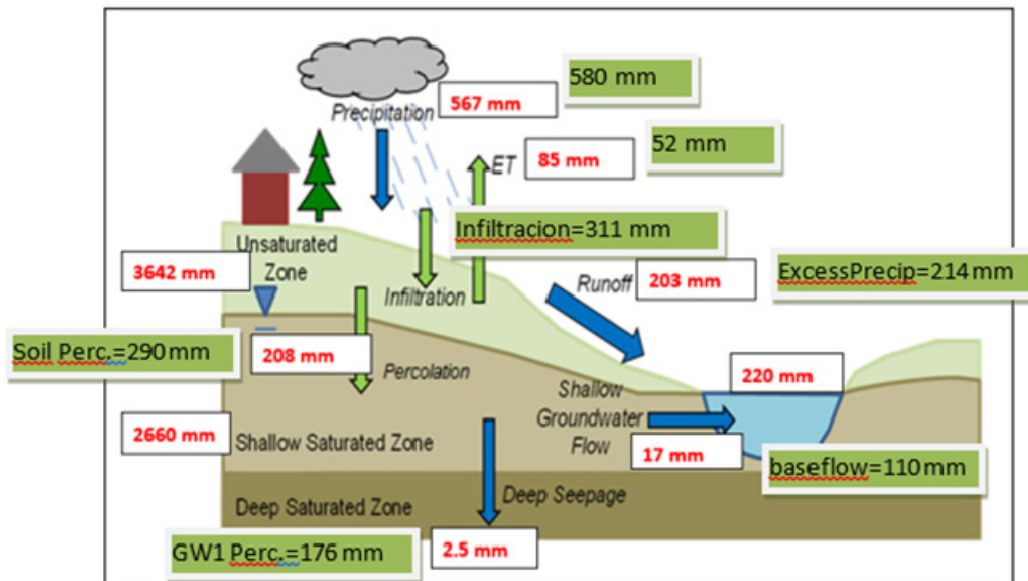


Figura 9. Balance para el mes de marzo-2007, resultados de HydroBID (rojo) y HEC-HMS (verde)

### 3.3. Mapas de escorrentía

El modelo HydroBID para cada corrida genera varios archivos con los resultados, uno de ellos es el “spatial\_file-Los\_Padres\_Original.csv”, que contienen los valores de varios parámetros para cada una de las subcuencas (COMID). Uno de esos parámetros es la escorrentía acumulada, denominada “Local CumulativeRunoff (cm/año)”. En la tabla 7 se listan los valores resultantes de las cuatro corridas (original y tres escenarios teóricos) realizadas para

los distintos escenarios de uso y otra corrida considerando el cambio climático. Se recuerda que el valor inicial de CN fue ajustado por el coeficiente de 0.88 (ver la tabla 2).

Se puede observar que cuanto mayor es el valor del CN mayores son los valores de escurrimiento (la relación es directamente proporcional), y en el porcentaje de variación respecto a la situación original en los escenarios 2 y 3 en algunas subcuencas se supera el valor original.

Analizando la variación de los valores promedios en la cuenca de dicha variable, entre el escenario original (CN 62.5 promedio areal) y los teóricos se observa: en el escenario 1 (Agricultura/ Pastizales CN 56.3) una disminución del 28%, en el escenario 2

(Humedales CN 61.6) una disminución del 5%, en el escenario 3 (Tierras agrícolas seca y pastizales CN 66) un aumento del 18%. Por lo tanto, la situación de menores valores de escurrimiento se va en el escenario con Agricultura y Pastizales.

Tabla 7. Valores de escurrimiento (cm/año) para cada subcuenca, los 4 escenarios y cambio climático

COMID	Original		Escenario 1 (CN 56.3)		Escenario 2 (CN 61.6)		Escenario 3 (CN 66)		Original con cambio climático	
	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)
316367700	9.01	100	6.52	72	8.64	96	10.80	120	11.41	127
316398200	10.49	100	6.65	63	8.79	84	10.96	105	13.21	126
316367800	10.71	100	6.68	62	8.83	82	11.02	103	13.45	126
316394800	8.47	100	6.56	77	8.67	102	10.83	128	10.71	126
316401700	8.44	100	6.47	77	8.57	102	10.71	127	10.67	126
316394700	8.44	100	6.50	77	8.61	102	10.76	127	10.67	126
316414600	8.99	100	6.55	73	8.59	96	10.68	119	11.36	126
316398100	9.99	100	6.48	65	8.58	86	10.72	107	12.60	126
316421700	8.42	100	6.47	77	8.54	101	10.65	126	10.68	127
<b>Promedio de la diferencia</b>			<b>72</b>		<b>95</b>		<b>118</b>		<b>126</b>	

Con los valores obtenidos en cada escenario se generaron cuatro mapas, para así mostrar y analizar la variación espacial de la escurrimiento en cada subcuenca. En todos los mapas se utilizó la misma simbología, de manera de poder comparar los resultados, como se observa en la figura 10. Analizando la tabla 7 y la figura 10, se puede observar que en las subcuencas del norte (COMID 316367800 y 316398200) se registran los mayores valores de escurrimiento. En el caso de la situación original, esto se debe a que en esas subcuencas es elevado el porcentaje de uso de suelo 2 -Tierras agrícolas seca y pastizales, lo que da un valor de CN promedio areal de 65.4 y 65.1 respectivamente (valores ajustado con el coeficiente 0.88) resultando mayor la escurrimiento. Para los otros escenarios teóricos, donde el uso de suelo y por lo tanto el valor de CN es el mismo en todas las subcuencas, se pueden observar variaciones en las escurrimientos, siendo las mayores en las mismas subcuencas de la zona norte (en el mapa del escenario 2 se puede observar más claramente). Es por eso que se puede estimar que los valores altos de escurrimiento en las subcuencas del norte, están además influenciada por la precipitación, de acuerdo a la interpolación climática realizada, esta parte de la cuenca recibe más lluvia que las otras áreas. Se realizó otro mapa para la situación original sin y con cambio climático

(aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10%), con otra simbología, por ser muy diferentes los valores de escurrimiento obtenidos, como se observa en la figura 11. La diferencia entre los valores de escurrimiento entre la situación original sin y con cambio climático es del orden del 26% de aumento. Aquí se puede apreciar que las subcuencas del norte (COMID 316367800 y 316398200), que tienen mayores valores de CN y precipitación, ante los efectos del cambio climático, serían las subcuencas que tendrían mayor impacto y sufrirían más las consecuencias que las subcuencas del sur. Estos resultados son muy importantes porque pueden dar luz de los lugares donde se deben priorizar medidas de mitigación.

#### 4. CONCLUSIONES

La utilización de la AHD con la delimitación de cuencas y tramos de cauce y una base de datos asociada facilita el trabajo de preparar los datos para aplicar el modelo, pero en cuencas de llanura con intervención antrópica (canalizaciones) y en la zona del valle de inundación del río Paraná, debe ser revisada antes de utilizarse, pues puede tener errores de conectividad y sentido de escurrimiento, debiendo ser modificada.

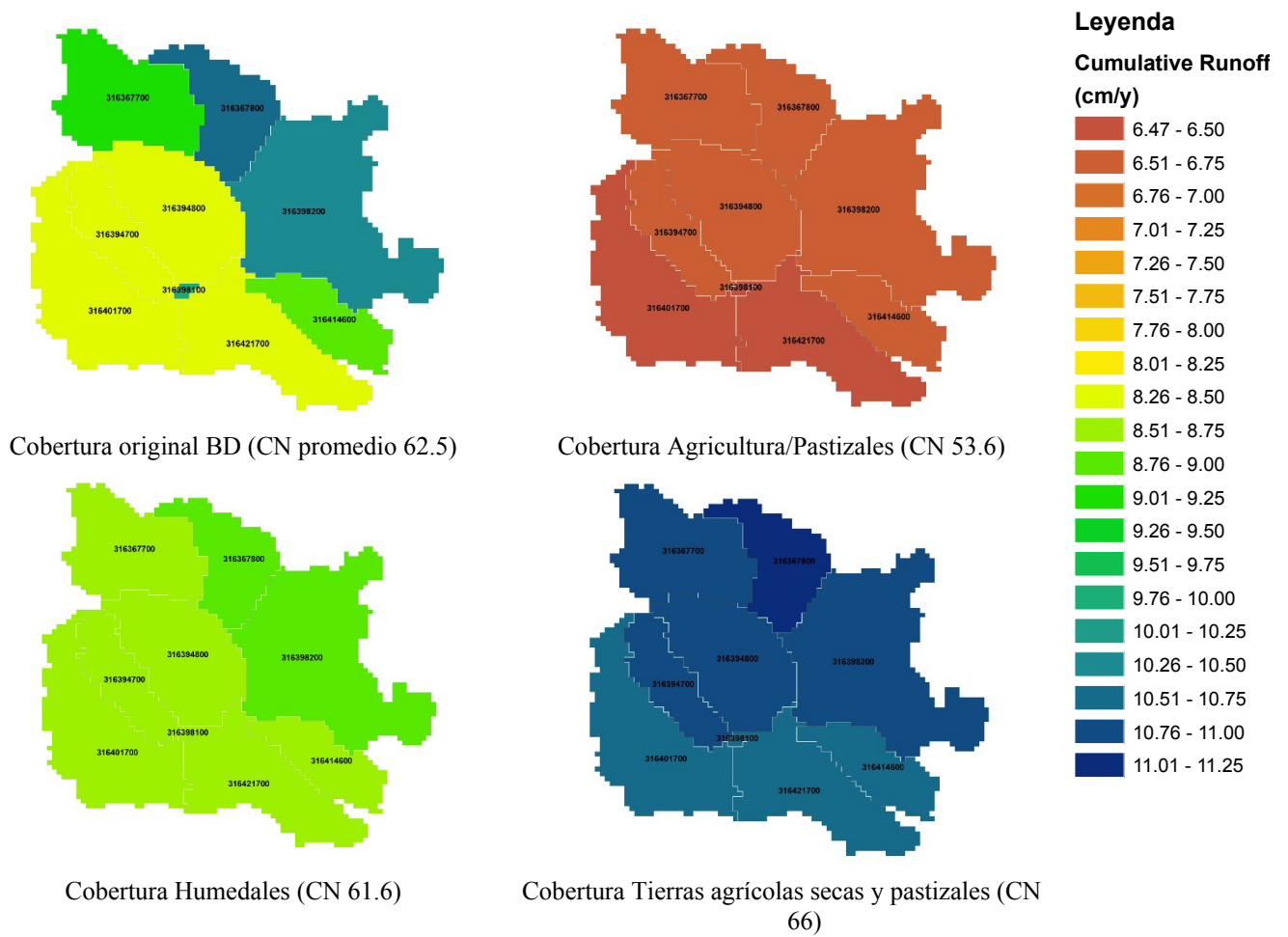


Figura 10. Mapas de escorrentía para las 4 uso de suelo considerado

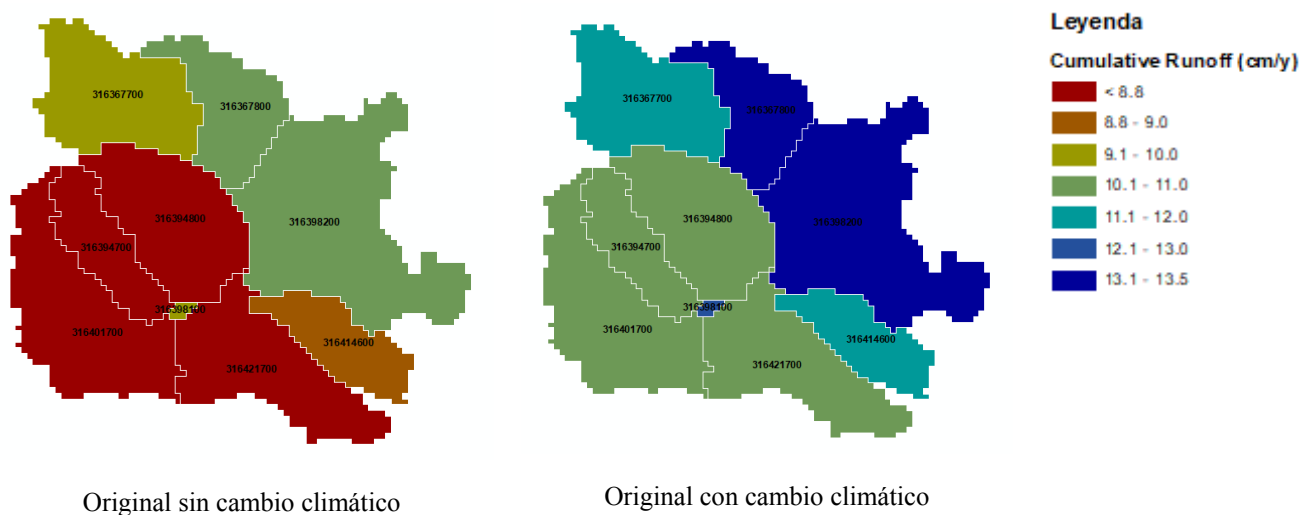


Figura 11. Mapas de escorrentía sin y con cambio climático

Además, se deben analizar los valores de uso del suelo de la tabla *Catchment\_nlcd\_soils*, en la BD *argentina\_revised.sqlite*, para conocer los tipos de uso del suelo se estarán modelando en la cuenca de estudio. HydroBID requiere para su aplicación series diarias de precipitación y temperatura con valores completos, que muchas veces no se dispone. En este caso no existía una estación en la cuenca, por lo que se seleccionaron tres estaciones confiables, dos cercanas y una a 50 km de la cuenca. La serie debió ser completadas en los datos faltantes, siendo el periodo de estudio de 28 años (1989-2016). Una vez generados los datos necesarios para aplicar el modelo, es muy fácil y sencillo realizar las distintas corridas. Se realizaron las corridas utilizando cuatro tablas con diferentes usos del suelo (original y 3 escenarios teóricos) y además considerando el cambio climático, con un aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10%, para la condición original de uso del suelo. Los parámetros que se ajustaron en el HydroBID fueron el CN y el contenido de disponible de agua (CDA) con valores multiplicativos menores a la unidad, 0.88 y 0.85 respectivamente. HydroBID muestra un buen desempeño para representar los volúmenes mensuales del balance hídrico, pero sobrestima significativamente los caudales diarios máximos de crecidas. Es un modelo pensado para cuantificar el balance hídrico y no para la modelación de eventos. Los valores obtenidos en los balances de agua anuales dan como resultado valores similares a los promedios registrados en la zona, como la precipitación de 1,089 mm y la evapotranspiración de

844 mm. Además, que la percolación supera a la escorrentía, verificándose lo dicho que en estos sistemas hidrológicos de llanura predomina el movimiento vertical del agua (evaporación, transpiración e infiltración) sobre los horizontales. Los mapas generados con los valores de escorrentía obtenidos para cada subcuenca, resultantes de las corridas realizadas para los 4 escenarios de uso del suelo, se puede observar que cuanto mayor es el valor del CN mayores son los valores de escurrimiento (runoff), variando entre 6.5 y 11 cm/año, mostrando cuales son las subcuencas con mayores valores. Para los escenarios teóricos analizados se obtuvo para el escenario 1 (Agricultura/ Pastizales) una disminución de la escorrentía del 28%, en el escenario 2 (Humedales) una disminución del 5%, en el escenario 3 (Tierras agrícolas seca y pastizales) un aumento del 18%, lo que demuestra una buena sensibilidad del modelo. El aumento de los valores de escorrentía considerando el escenario de cambio climático previsto para el período 2081-2100, es muy importante, llegando al 26%, siendo las subcuencas del norte las más afectadas, por tener los mayores valores de CN y precipitación, por lo tanto, sufrirían más las consecuencias que las subcuencas del sur. Que el modelo HydroBID de como resultados estos escurrimientos promedios por subcuenca, permite realizar de manera fácil y sencilla los mapas en QGIS, y así representar las variaciones debido al cambio de uso de suelo y a los efectos producidos por cambio climático, dando luz de los lugares donde se deben priorizar medidas de mitigación.

## REFERENCIAS

- KNMI, K. N. (1 de Marzo de 2020). Atlas del cambio climático de KNMI. (K. N. Instituut, Editor) Obtenido de [https://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](https://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py)
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz, R. (2017). Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio. Washington: BID.
- Nalesso, M., & Coli, P. (2017). Guía paso a paso: Manual de Hydro-BID. Washington: BID. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Gu%C3%ADa-paso-a-paso-Manual-de-Hydro-BID.pdf>
- Rineer, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz Castillo, R. (2014). Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe. Washington: BID. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Base-de-Datos-de-Hidrolog%C3%ADa-Anal%C3%ADtica-para-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>

*Como citar este artículo:*

Arbuet A. *et al.*, (2021). Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe-Argentina. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 81-96. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-06



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

## Potencialidades hídricas superficiales de la cuenca hidrográfica del Río Sevilla en el municipio Guamá

*Surface hydrological potential of Sevilla river watershed in Guamá municipality*

Aqua-LAC  
Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

Liber Galbán Rodríguez\*<sup>1</sup>, Guadalupe Bermúdez Diéguez<sup>2</sup>,  
Ernesto Ramos Aguilar<sup>3</sup>

Recibido: 24/03/2021

Aceptado: 16/04/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

La cuenca hidrográfica del río Sevilla ubicada al este de la provincia Santiago de Cuba en el municipio Guamá carecía de estudios desde el punto de vista ingenieril-hidrológico detallado; por lo que se brinda una caracterización de las potencialidades hídricas de la cuenca y subcuencas que la conforman, para la posible realización de futuros planeamientos y/o reordenamientos de los recursos hídricos. Este estudio tiene gran importancia ya que dicha cuenca posee un gran potencial hídrico que provoca durante los períodos de lluvias intensas crecidas que incomunican el municipio Guamá con la ciudad cabecera provincial. El conocimiento de los valores de escurrimiento de esta zona es imprescindible para conocer los niveles de inundación de la cuenca y algunas de sus vulnerabilidades, lo cual es determinado empleando varios métodos hidrológicos que garantizan una mayor seguridad en la información de esta zona rural.

**Palabras clave:** escurrimiento, potencial hídrico, cuenca hidrográfica, Sevilla, Guamá, Santiago de Cuba.

### Abstract

*The watershed of the river Seville located at the east of Santiago de Cuba province in the Guamá municipality, was needing studies from the engineering - hydrological point of view, for which it is desired to provide a characterization of the potentialities of this watershed and its sub-basins, for the possible realization of future planning and / or rearrangements of water resources. This study has great importance since said watershed has a great hydrological potential which causes that when heavy rains occur, the communications of Guamá municipality with Santiago de Cuba capital city is cut off. The knowledge of the values of runoff of this area is essential to know the levels of flooding and some of its vulnerabilities, which is determined through different hydrological methods, guaranteeing greater security to the information of this rural area.*

**Keywords:** runoff, hydro potential, watershed, Sevilla, Guamá, Santiago de Cuba.

1 Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. liberg@uo.edu.cu

2 Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos, Santiago de Cuba, Cuba. lupe@eah.stg.hidro.cu

3 Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. lfernando.duran@uo.edu.cu

## 1. INTRODUCCIÓN

Según González (2004), en Cuba, antes de 1959 no existía un programa o proyecto gubernamental para gestionar o reducir el impacto social en las cuencas hidrográficas. A partir de esta fecha, se ha potenciado lo que se ha conocido también como “manejo de cuencas”, que se caracteriza por una administración sectorial especialmente dirigida hacia los ámbitos de los recursos hídricos, los recursos agroforestales y a la agricultura extensiva. En este ámbito se creó el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas (CNCH) y estructuras inferiores en el año 1997, cuya función principal es coordinar los esfuerzos de todas las instituciones del país relacionadas con las cuencas hidrográficas, para eliminar o reducir los factores de degradación ambiental de las mismas. Hoy existe un Comité Técnico Asesor que tiene la función de asesorar a los gobiernos en la toma de decisiones, en el que están representados los principales ministerios e instituciones del país, y es presidido por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). A nivel nacional se trabaja en el diseño de políticas y mecanismos de planificación para el ordenamiento, con el propósito de articular las estrategias de conservación y aprovechamiento sostenible de sus

recursos naturales. A pesar de esto, persisten importantes conflictos socio-ambientales en torno a la administración hídrica en las cuencas hidrográficas, lo que en gran medida está condicionado por el conocimiento detallado de sus potencialidades y otros factores de origen antrópico (Planas- Fajardo, 2013). En cuanto a los estudios de las potencialidades hídricas detalladas en cuencas hidrográficas se refiere, en Cuba se ha logrado un limitado avance, generalmente asociado a los estudios de aprovechamiento hidroenergético; quedando un gran vacío por resolver tanto a nivel nacional, provincial como local (García y Gutiérrez, 2015). En este caso se encuentra la cuenca hidrográfica del río Sevilla, localizada en el municipio Guamá, al este de la provincia Santiago de Cuba, específicamente en el cuadrante N: 140.100 - 140.300, 169.800-169.997 de latitud norte y 540.200 - 560.600, 540.100 - 559.900 de longitud oeste aproximadamente. Con orientación de norte a sur, limita al norte con el río Contraamaestre específicamente con su afluente Mogote, al sur con las aguas del Mar Caribe, al sureste con la cuenca hidrográfica del río Macío y al suroeste con el río Guamá (Figura 1).

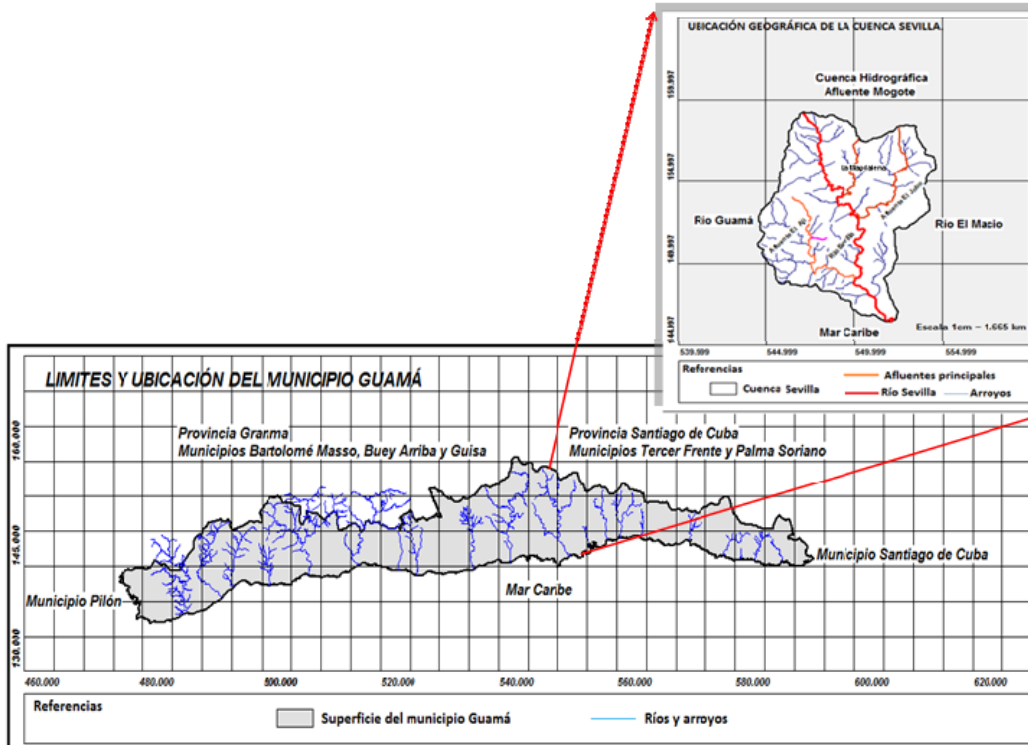


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Sevilla.

La cuenca hidrográfica del río Sevilla, hasta la fecha no contaba con un estudio detallado de sus potencialidades hídricas a partir del escurrimiento superficial que es la variable fundamental para conocer el potencial hídrico del que dispone el río y, en su determinación es imprescindible el estudio de las características físico geográficas de la cuenca. Por las razones antes mencionadas se persiguió como objetivo general, determinar las potencialidades hídricas superficiales detalladas de la cuenca

hidrográfica del río Sevilla y cada subcuenca que compone. Las potencialidades hídricas en cuencas hidrográficas se determinan por la caracterización del escurrimiento superficial y subterráneo del agua. El escurrimiento es el agua que proveniente de la precipitación que circula sobre (escurrimiento superficial) o bajo (escurrimiento subterráneo) la superficie terrestre y, que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Hierrezuelo, 2016) (Figura 2).

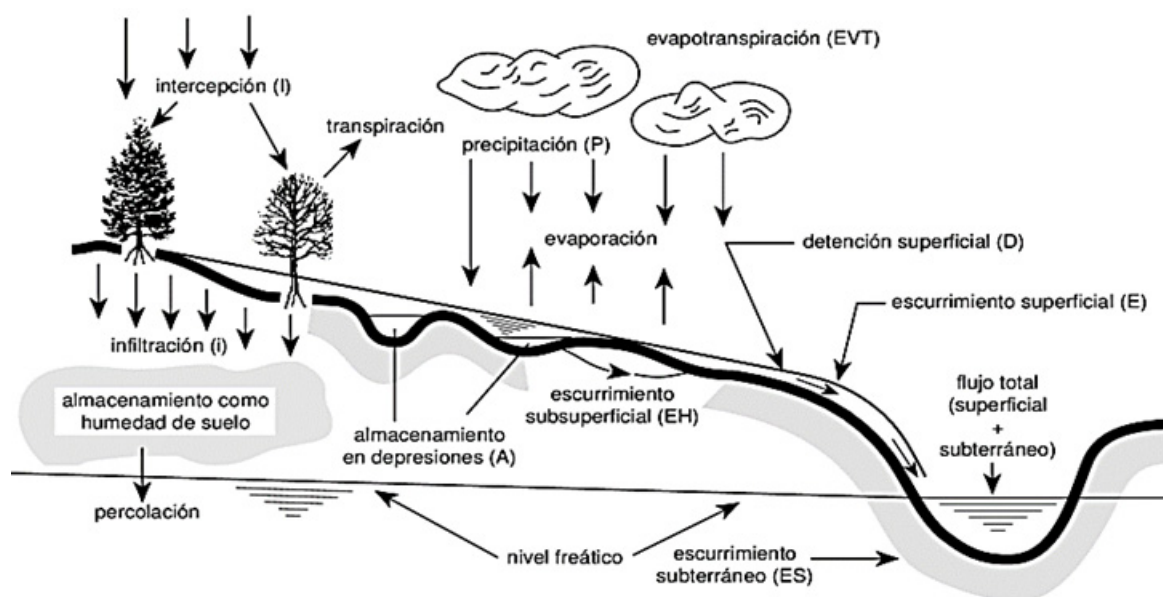


Figura 2. Esquema del escurrimiento superficial en los cauces de ríos de cuencas hidrográficas (Adaptado de Vich, 1996)

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Debido al proceso complejo de conversión de la lluvia en escurrimiento superficial, se ha dado lugar a que se desarrolle una gran cantidad de métodos para calcular los escurrimientos a partir de las lluvias. Los principales parámetros que intervienen en este proceso de conversión son: área de la cuenca, altura total de precipitación, características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.), distribución de la lluvia en el tiempo, distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca, entre otros. Con el avance tecnológico de las computadoras y software especializados se han generado modelos hidrológicos que estiman con bastante precisión los procesos involucrados en una cuenca.

Los métodos más aplicados en Cuba son: I Variante Ing. José Luis Batista, II Variante Ing. José Luis Batista, III Variante Ing. José Luis Batista, Métodos Genéticos, Método de Balance Hídrico, las Fórmulas Clásicas, las Fórmulas Hidrometeorológicas, además de Analogía y Modelos Matemáticos e Hidrológicos. (Durand, 2017).

Para el caso que ocupa la investigación en la cuenca hidrográfica del río Sevilla se determinó obtener el escurrimiento medio por cuatro métodos:

- II Variante de José Luis Batista.
- III Variante de José Luis Batista.
- Fórmulas clásicas
- Fórmula hidrometeorológica, a partir de la lluvia obtenida por la última versión del mapa isoyético nacional cubano (1961-2000).

El coeficiente de variación (Cv) en cada método se obtuvo por la fórmula de Riazanov:  $C_V=0.95-0.36*\log M_o$ . Donde:  $M_o$  es el módulo del escurrimiento expresado en  $l/s/km^2$ , de ahí el volumen de escurrimiento en  $106m^3$  y el gasto en  $m^3/s$ . En 1991, el ingeniero José Luis Batista propuso un método basado en la recopilación de los gastos líquidos de 58 estaciones hidrométricas por toda Cuba por un período de 25 años, comprendidos entre los años 1964 y 1988, a este método se le conoce como la III Variante de José Luis Batista, para este período concluyó que era suficiente puesto que dentro de estos años habían ocurrido años secos, medios y húmedos. En esta etapa el autor dedujo un sistema de ecuaciones para el cálculo del escurrimiento medio anual, dichas formulaciones las fraccionó por regiones (Occidental, Central y Oriental). Por esta razón, se ha estudiado la distribución físico-geográfica de las cuencas y el análisis de sus elementos principales (área de la cuenca, precipitación y altura media de la cuenca), llegando a los siguientes resultados (Hierrezuelo, 2016).

1. La correlación entre el módulo de escurrimiento medio anual ( $M_o$ ) y las precipitaciones ( $P$ ) para los ríos de las regiones Occidental y Central es más precisa que la obtenida para todo el territorio.
2. En la región Oriental deben considerarse dos relaciones  $M_o=f(P)$ , que se nombrarán: Oriental 1 y 2, la primera para  $P<1500$  mm y  $H_m< 250$  m.s.n.m., la segunda (Oriental 2) acotada en  $P>1500$  mm y/o  $H_m>250$  msnm.
3. Se propone un sistema de ecuaciones de tipo parabólico para calcular el escurrimiento medio anual cuando no existan observaciones hidrométricas.

La II Variante de José Luis Batista es una de las más utilizadas en Cuba, obteniéndose la variable normalizada de las precipitaciones ajustada para períodos de estiaje y de corrientes permanentes, también existen sus expresiones por regiones en el país.

$$U_o(Y_o)=f[0.897U_1(P_o)] \quad (1)$$

donde

$Y_o$  es la lámina del escurrimiento medio anual

$P_o$  es la lluvia media hiperanual

$U_o$  y  $U_1$  son variables normalizadas de la lámina de escurrimiento y de la lluvia respectivamente

Con el valor de la lluvia  $P_o$  entramos a la tabla propuesta por el autor y se busca el valor de  $U_1$  para la región Oriental. Se sustituyen los valores en la

ecuación 1 y obtenemos la lámina de lluvia. Este valor se sustituye en la ecuación 2 y obtenemos el escurrimiento medio anual:

$$W_o = \frac{Y_o * A_c}{1000} \quad (2)$$

donde

$W_o$  es el escurrimiento medio anual

$A_c$  es el área de la cuenca o sub cuenca

Sustituyendo el valor de escurrimiento obtenido en la ecuación 3 y obtiene el valor de  $Q_o$ . El módulo de escurrimiento se obtiene mediante la ecuación 4.

$$Q_o = W_o * 31.54 \quad (3)$$

$$Q_o = \frac{M_o * A_c}{1000} \quad (4)$$

$$M_o = 2.53P^{2.72} * 10^{-8} \quad (5)$$

$$Q_o = \frac{M_o * A_c}{1000} \quad (6)$$

*Variante de José Luis Batista*

Utilizando la ecuación 5 y con el valor de la lluvia media anual de la cuenca, se calcula el valor del módulo de escurrimiento de la cuenca. Este valor se

sustituye en la ecuación 7 y se obtiene el escurrimiento. Con el resultado del escurrimiento y el área de la cuenca se sustituye en la ecuación 8 y se determina la lámina de escurrimiento.

$$W_o = Q_o * 31.54 \tag{7}$$

$$Y_o = (W_o / A_c) * 1000 \tag{8}$$

*Fórmulas Clásicas*

Con el valor del coeficiente de escurrimiento, el de precipitación media de la cuenca y el área de la cuenca, se sustituye en la ecuación 9 y se obtiene el escurrimiento medio. El caudal se obtiene sustituyendo el valor de escurrimiento en la ecuación

10. El módulo de escurrimiento se determina a partir de la ecuación 11 sustituyendo los valores de caudal y área de la cuenca. Se sustituyen los valores de escurrimiento y área de la cuenca en la ecuación 12 y se obtiene la lámina de escurrimiento.

$$W = (C * P * A) / 1000 \tag{9}$$

$$Q_o = W_o / 31.54 \tag{10}$$

$$M_o = (Q_o / A_c) * 1000 \tag{11}$$

$$Y_o = (W_o / A_c) * 1000 \tag{12}$$

*Fórmula Hidrometeorológica*

Sustituyendo el valor de la lluvia en la ecuación 13, se calcula la lámina de escurrimiento. Seguidamente se sustituyen los valores de lámina de escurrimiento y área de la cuenca en la ecuación 14 y resulta el valor

de escurrimiento. Con el escurrimiento se calcula en la ecuación 15 el gasto. El módulo de escurrimiento se obtiene a partir de la ecuación 16 con la sustitución de los valores de caudal y área de la cuenca.

$$Y_o = (0.845 * P_o) - 759.7 \tag{13}$$

$$W_o = (Y_o * A_c) / 1000 \tag{14}$$

$$Q_o = W_o / 31.54 \tag{15}$$

$$M_o = (Q_o / A_c) * 1000 \tag{16}$$

**3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las principales características generales de la cuenca del río Sevilla fueron tomadas de estudios anteriores que no contaban con análisis detallado, realizados por Durán (2017) (Tabla 1). En donde  $A_c$  es el área de la cuenca ( $km^2$ ),  $H_m$  es la altura media de la cuenca (m),  $L_r$  es la longitud del río (km),  $H_1$  es la cota del nacimiento del río (msnm),  $H_2$  es la cota de la desembocadura del río (msnm),  $Y_r$  es la pendiente del río (%),  $Y_c$  es la pendiente media de la cuenca (%),  $D_d$  es la densidad de drenaje ( $km/km^2$ ). La clasificación de las corrientes identifica si son permanentes (P) o intermitentes (I). El clima es muy variado. La temperatura media anual en la cuenca es de  $26^\circ C$  en la costa, presentando un mínimo de  $24^\circ C$  en los meses de enero y febrero, y un máximo de  $28^\circ C$  en los meses de julio y agosto. La media del periodo seco (Noviembre-Abril) es de  $25^\circ C$  y el del

lluvioso (Mayo-October) es de  $27.5^\circ C$ . En la ladera, la temperatura media decrece a razón de  $0.54^\circ C$  por cada 100 metros que ascendemos, por lo que a 1200 metros la media es de  $20^\circ C$ .

El régimen de precipitación de la zona fue determinado por el mapa Isoyético de la República (1961-2000) en un período comprendido de 39 años, debido a que actualmente no se cuenta con pluviómetros en la zona producto de emigración de la población. La amplia extensión del área y su variado relieve permiten variaciones en la lluvia media de la zona desde 980 hasta 2600 mm; por ello existen las condiciones necesarias para la formación del escurrimiento superficial permanente, en especial en la parte alta y media de la cuenca, lo que asociado a las fuertes pendientes y la morfometría de sus afluentes, permiten la formación de grandes avenidas en épocas de lluvias intensas (Figura 3).

Tabla 1 Características geomorfológicas de la cuenca Sevilla. Fuente: Durand (2017).

Río Sevilla	Coordenadas		A <sub>c</sub>	H <sub>m</sub>	L <sub>r</sub>	Y <sub>R</sub>	Y <sub>C</sub>	D	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	Clasif
	N	E									
	146.4	522.1	83.3	422	18.5	50.8	421	0.86	940	0	P

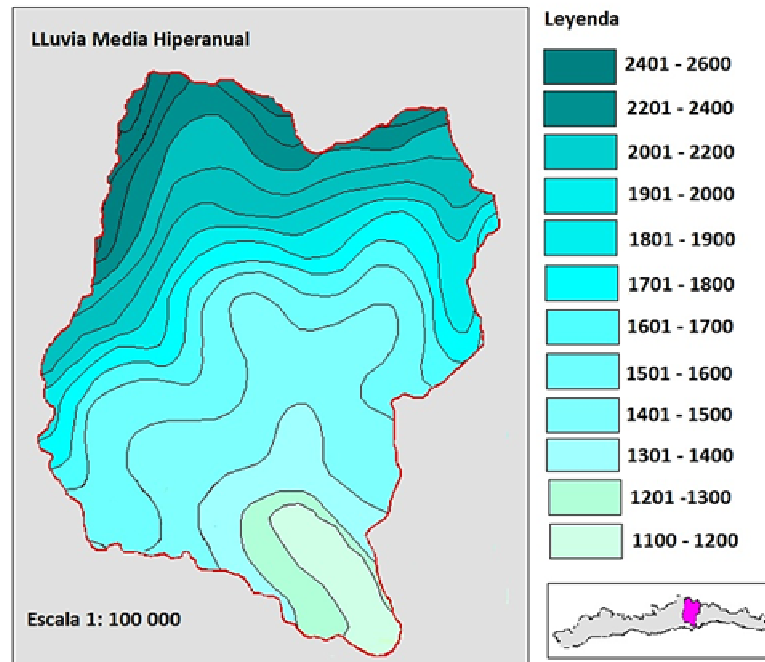


Figura 3. Mapa de Lluvia Media Hiperanual cuenca hidrográfica del río Sevilla  
Fuente: Mapa Isoyético de la República de Cuba.

La Cuenca está dominada en sus mayores partes por zonas pre montañosas y montañosas, aunque coexisten otras formas de relieve como pequeñas ondulaciones y terrazas. Entre estas llanuras se localizan partes de las alturas que se alcanzan hasta 250-300 m. Al norte se encuentran las estribaciones de la Sierra Maestra donde la mayor elevación dentro de la cuenca es de 940 metros sobre el nivel del mar (msnm) coincidiendo con la línea divisoria de las aguas, esta cuenca es de un río de montaña y debido al predominio de zonas altas cerca del parte aguas central y a pendientes más pronunciadas, por lo que aumenta la capacidad de evacuación de las aguas (Figura 4). De acuerdo a los principales afluentes del río Sevilla se delimitaron las principales subcuencas del propio río, en total de 23 subcuencas. Esta delimitación está basada en las corrientes que afluyen directamente al río Sevilla, tanto por la margen izquierda como por la margen derecha; en primer lugar se tienen por la margen derecha 15 y por la

izquierda 8 (Figura 5). En la región en estudio específicamente, no se cuenta con estaciones hidrométricas, por lo que la evaluación del potencial hídrico se realizó a través de los métodos antes mencionados. A partir de estos requerimientos se obtuvo el potencial hídrico detallado o disponibilidad de agua mostrados a continuación (Tabla 2, 3, 4 y 5). Al realizar una comparación de los resultados obtenidos por los diferentes métodos escogidos, se despreció en una primera instancia el método de las Fórmulas Hidrometeorológica debido a que el valor de escurrimiento se disparó con respecto al resto de los métodos. Por lo que al continuar con la comparación de los resultados se escogió la II Variante del Ing. José Luis Batista por ser una de las más utilizadas en el país, obteniéndose la variable normalizada de las precipitaciones y que está ajustada para períodos de estiaje y de corrientes permanentes y también existen las expresiones por regiones en el país.

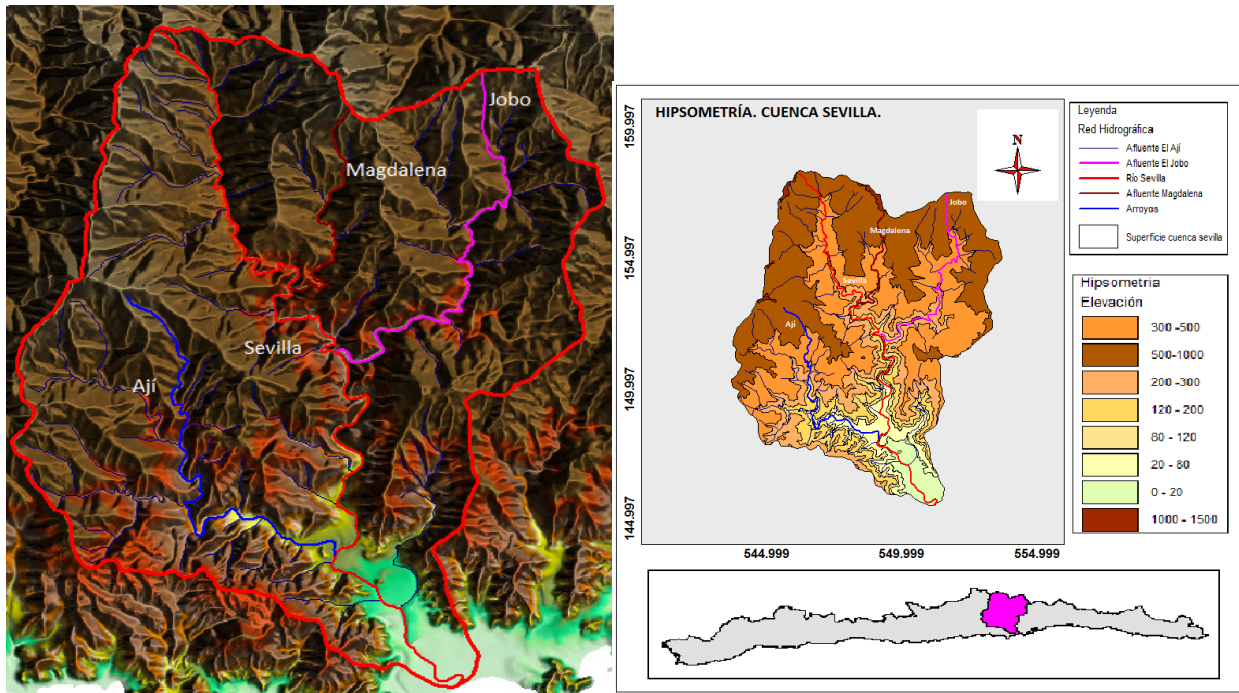


Figura 4. A la izquierda Modelo Digital del terreno y a la derecha mapa de Hipsometría. Fuentes: Base Cartográfica Digital de Geocuba 1: 25 000. Base Cartográfica Digital de la PPF 1: 25 000.

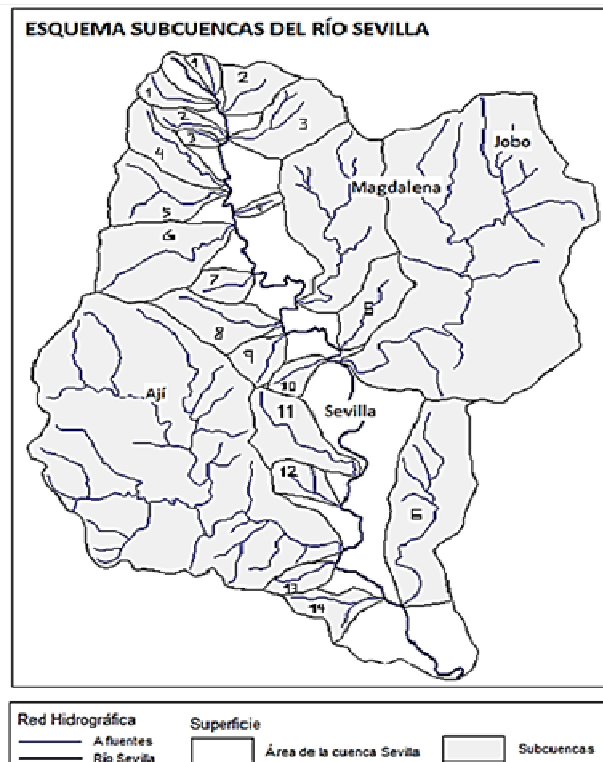


Figura 5. Subcuencas del río Sevilla

Tabla 2. Disponibilidad de agua calculada por el método sugerido en la II Variante de José Luis Batista.

Método	Cuencas y Subcuencas	Ac	Po	Wo	Qo	Yo	Mo	Cv
II Variante	Cuenca río Sevilla	83.2	1473	32.36	1.026	389	12.33	0.56
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 1	0.574	2185	0.525	0.017	915	29.01	0.42
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 2	0.443	2280	0.447	0.014	1009	31.99	0.41
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 3	0.223	2185	0.204	0.006	915	29.01	0.42
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 4	1.296	2233	1.261	0.040	973	30.85	0.41
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 5	1.860	2090	1.548	0.049	832	26.38	0.44
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 6	2.957	2090	2.460	0.078	832	26.38	0.44
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 7	0.617	1663	0.360	0.011	583	18.48	0.49
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 8	1.500	1598	0.807	0.026	538	17.06	0.51
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 9	0.728	1551	0.373	0.012	512	16.23	0.51
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 10	0.492	1457	0.222	0.007	452	14.33	0.53
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 11	1.900	1410	0.874	0.028	460	14.58	0.53
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 12	0.701	1410	0.323	0.010	460	14.58	0.53
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 13	0.543	1181	0.559	0.018	1029	32.63	0.41
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 14	0.884	1256	0.302	0.010	342	10.84	0.58
	El Ají	20.18	1395	9.888	0.314	490	15.54	0.52
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 1	0.292	2280	0.295	0.009	1009	31.99	0.41
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 2	1.029	2199	0.968	0.031	941	29.84	0.42
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 3	1.915	2185	1.752	0.056	915	29.01	0.42
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 4	0.207	1853	0.138	0.004	665	21.08	0.47
	La Magdalena	5.211	1853	3.465	0.110	665	21.08	0.47
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 5	1.378	1568	0.714	0.023	518	16.42	0.51
	EL Jobo	18.89	1517	9.369	0.297	496	15.73	0.52
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 6	4.722	1344	1.988	0.063	421	13.35	0.54

Tabla 3. Disponibilidad de agua calculada por el método sugerido en la III Variante de José Luis Batista.

Método	Cuencas y Subcuencas	Ac	Po	Wo	Qo	Yo	Mo	Cv
III Variante	Cuenca río Sevilla	83.2	1473	27.49	0.872	330	10.48	0.43
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 1	0.574	2185	0.555	0.018	967	30.65	1.04
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 2	0.443	2280	0.480	0.015	1085	34.41	1.06
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 3	0.223	2185	0.216	0.007	967	30.65	1.19
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 4	1.296	2233	1.328	0.042	1025	32.50	0.91
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 5	1.860	2090	1.593	0.051	857	27.16	0.88
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 6	2.957	2090	2.533	0.080	857	27.16	0.80
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 7	0.617	1663	0.284	0.009	460	14.57	1.15
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 8	1.500	1598	0.619	0.020	413	13.09	1.02
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 9	0.728	1551	0.277	0.009	381	12.07	1.15
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 10	0.492	1457	0.158	0.005	321	10.18	1.24



Sub Cuenca MD desde nacimiento: 11	1.900	1410	0.558	0.018	294	9.31	1.04
Sub Cuenca MD desde nacimiento: 12	0.701	1410	0.206	0.007	294	9.31	1.20
Sub Cuenca MD desde nacimiento: 13	0.543	1181	0.098	0.003	181	5.75	1.31
Sub Cuenca MD desde nacimiento: 14	0.884	1256	0.189	0.006	214	6.79	1.21
El Ají	20.18	1395	5.756	0.183	285	9.04	0.68
Sub Cuenca MI desde nacimiento: 1	0.2926	2280	0.318	0.010	1085	34.41	1.13
Sub Cuenca MI desde nacimiento: 2	1.029	2199	1.012	0.032	984	31.20	0.95
Sub Cuenca MI desde nacimiento: 3	1.915	2185	1.851	0.059	967	30.65	0.85
Sub Cuenca MI desde nacimiento: 4	0.207	1853	0.128	0.004	617	19.56	1.27
La Magdalena	5.211	1853	3.215	0.102	617	19.56	0.77
Sub Cuenca MI desde nacimiento: 5	1.378	1568	0.540	0.017	392	12.42	1.05
EL Jobo	18.89	1517	6.766	0.215	358	11.36	0.65
Sub Cuenca MI desde nacimiento: 6	4.722	1344	1.218	0.039	258	8.18	0.92

Tabla 4. Disponibilidad de agua calculada por el método de la fórmula clásica.

Método	Cuencas y Subcuencas	Ac	Po	Wo	Qo	Yo	Mo	Cv
Fórmulas Clásicas	Cuenca río Sevilla	83.2	1473	30.53	0.971	368	11.67	0.57
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 1	0.574	2185	0.314	0.010	546	17.32	0.50
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 2	0.443	2280	0.252	0.008	570	18.07	0.50
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 3	0.223	2185	0.122	0.004	546	17.32	0.50
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 4	1.296	2233	0.723	0.023	558	17.70	0.50
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 5	1.860	2090	0.972	0.031	523	16.57	0.51
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 6	2.957	2090	1.545	0.049	523	16.57	0.51
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 7	0.617	1663	0.256	0.008	416	13.18	0.55
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 8	1.500	1598	0.599	0.019	400	12.67	0.55
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 9	0.728	1551	0.282	0.009	388	12.29	0.56
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 10	0.492	1457	0.179	0.006	364	11.55	0.57
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 11	1.900	1410	0.670	0.021	353	11.18	0.57
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 12	0.701	1410	0.247	0.008	353	11.18	0.57
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 13	0.543	1181	0.160	0.005	295	9.36	0.60
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 14	0.884	1256	0.277	0.009	314	9.95	0.59
	El Ají	20.18	1395	7.038	0.223	349	11.06	0.57
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 1	0.2926	2280	0.167	0.005	570	18.07	0.50
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 2	1.029	2199	0.566	0.018	550	17.43	0.50
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 3	1.915	2185	1.046	0.033	546	17.32	0.50
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 4	0.207	1853	0.096	0.003	463	14.68	0.53
	La Magdalena	5.211	1853	2.413	0.077	463	14.68	0.53
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 5	1.378	1568	0.540	0.017	392	12.42	0.56
	EL Jobo	18.89	1517	7.163	0.227	379	12.02	0.56
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 6	4.722	1344	1.587	0.050	336	10.65	0.58

Tabla 5. Disponibilidad de agua calculada por el método de las Fórmulas Hidrometeorológicas

Método	Cuencas y Subcuencas	Ac	Po	Wo	Qo	Yo	Mo	Cv
Fórmulas Hidrometeorológicas	Cuenca río Sevilla	83.2	1473	40.32	1.278	485	15.36	0.52
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 1	0.574	2185	0.624	0.020	1087	34.45	0.40
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 2	0.443	2280	0.517	0.016	1167	37.00	0.39
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 3	0.223	2185	0.243	0.008	1087	34.45	0.40
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 4	1.296	2233	1.460	0.046	1127	35.72	0.39
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 5	1.860	2090	1.872	0.059	1006	31.91	0.41
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 6	2.957	2090	2.976	0.094	1006	31.91	0.41
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 7	0.617	1663	0.398	0.013	645	20.45	0.48
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 8	1.500	1598	0.886	0.028	591	18.73	0.49
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 9	0.728	1551	0.401	0.013	551	17.47	0.50
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 10	0.492	1457	0.232	0.007	471	14.95	0.53
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 11	1.900	1410	0.820	0.026	432	13.69	0.54
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 12	0.701	1410	0.303	0.010	432	13.69	0.54
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 13	0.543	1181	0.129	0.004	238	7.56	0.63
	Sub Cuenca MD desde nacimiento: 14	0.884	1256	0.266	0.008	301	9.55	0.60
	El Ají	20.18	1395	8.457	0.268	419	13.29	0.55
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 1	0.2926	2280	0.341	0.011	1167	37.00	0.39
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 2	1.029	2199	1.131	0.036	1099	34.83	0.39
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 3	1.915	2185	2.081	0.066	1087	34.45	0.40
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 4	0.207	1853	0.167	0.005	806	25.54	0.44
	La Magdalena	5.211	1853	4.198	0.133	806	25.54	0.44
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 5	1.378	1568	0.778	0.025	565	17.91	0.50
	El Jobo	18.89	1517	9.861	0.313	522	16.55	0.51
	Sub Cuenca MI desde nacimiento: 6	4.722	1344	1.776	0.056	376	11.93	0.56

#### 4. CONCLUSIONES

En Cuba existen limitaciones en el estudio detallado del potencial hídrico superficial en cuencas hidrográficas que influyen en un correcto planeamiento y/o reordenamiento de los recursos hídricos en aras de un manejo óptimo de estos. Se determinó el potencial hídrico superficial detallado de la cuenca del río Sevilla por cuatro métodos diferentes, obteniéndose que el método más idóneo fuera la II Variante del Ing. José Luis Batista. En total el potencial hídrico para el río Sevilla, se estima en  $32.36 \times 10^6 \text{m}^3$ , volumen que alimenta a los acuíferos, muy por debajo de la escorrentía.

#### RECOMENDACIONES

La cuenca del río Sevilla presenta un potencial hídrico muy importante que debe ser protegido mediante prácticas adecuadas de uso del suelo. Realizar un planeamiento y/o reordenamiento de la cuenca hidrográfica. Valorar la posible construcción de una presa y/o micro-presa para abastecer a aquellos asentamientos que no cuentan con servicio de agua, la agricultura, las vaquerías, etc.

## REFERENCIAS

- Andreianov V. (1959). Variaciones cíclicas del escurrimiento anual y su consideración en los cálculos hidrológicos. Trudí GGI, No. 68. Moscú.
- Aparicio, M. F, (2007). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, México. pp 303.
- Campos A., D. F. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico (Tomo I y II). Editorial Universitaria Félix Varela, Ciudad de la Habana.
- Durand, M, T. (2017). Evaluación del Potencial Hídrico de la Provincia Santiago de Cuba. ISBN 978-959-247-156-6. Marzo 2017.
- García Fernández, Jorge Mario; Gutiérrez Díaz, Joaquín B. (2015). La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas. La Habana, Cuba.
- González Piedra, Julio Iván (2004). El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Capítulo 1: “El manejo de cuencas en Cuba: Actualidad y Retos”. pp 21-40. Helena Cotler (compiladora). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Primera edición: diciembre de 2004. México. ISBN: 968-817-700-8. <http://centro.paot.mx/documentos/ine/452.pdf#page=22>
- Hierrezuelo Pérez, Rolando (2016). Metodología para la determinación del escurrimiento medio anual de una cuenca. Tesis en opción al título de Ingeniero hidráulico. Archivo del Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- Piedra, J. I. G. (2007). Guía metodológica para el estudio de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de Manejo, (inédito). C. Habana, Cuba.
- Planas-Fajardo (2013). “Empleo de indicadores para la planificación y gestión ambiental en la cuenca del río Sevilla del municipio Guamá, Santiago de Cuba”. Ciencia en su PC, No.4, octubre-diciembre, 2013, p.75-87.
- Rodríguez, F. F. (2006). “Mapa Isoyético de las precipitaciones medias de la República de Cuba, (1961-2000)”. Voluntad Hidráulica. No 98. ISSN 0505-9461. La Habana, Cuba.

### *Como citar este artículo:*

Galbán, L. *et al.*, (2021). Potencialidades hídricas superficiales de la cuenca hidrográfica del Río Sevilla en el municipio Guamá. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 97-107. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-07



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

## Modelización hidro-glaciológica actual y futura de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú

*Current and future hydro-glaciological modeling of the Yanamarey microbasin in the Cordillera Blanca, Peru*

Aqua-LAC

Member of the Intergovernmental Hydrological Programme  
para América Latina y el Caribe

Arnaldo Tacsi<sup>1,3\*</sup>, Thomas Condom<sup>2</sup>, Javier Garcia<sup>4</sup>,  
Alejo Cochachin<sup>1</sup>, Abel Mejia<sup>3</sup>

Recibido: 4/08/2021

Aceptado: 9/10/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Los recursos hídricos de la estación seca en los áridos Andes tropicales están disminuyendo debido a la fusión de los glaciares inducida por el cambio climático. La dinámica de escorrentía y derretimiento del glaciar se evaluó a la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca del Perú, aplicando el enfoque conceptual semi-distribuido con los modelos GSM (Glacier Snow Melt) y SOCONT (Soil Contribution), que integra procesos hidro-glaciológicos en zona glaciar y no-glaciar, para periodo base (2013 – 2018) y futuro (2018 – 2050) con escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5, utilizando datos diarios de temperatura y precipitación. En el periodo base de 5 años, el glaciar Yanamarey de 0.23 km<sup>2</sup> de superficie promedio presenta una fusión de hielo de 1281509 m<sup>3</sup> y la mayor contribución mensual de caudal de deshielo ocurre en el mes de noviembre (estación húmeda) y agosto (estación seca). El escenario futuro del glaciar Yanamarey con clima de CMIP5 de modelo regional RegCM4, predice que la masa de hielo se convertirá por completo a la escorrentía en agosto de 2030 en escenario RCP 8.5 y octubre de 2036 en RCP 2.6. El resultado advierte sin la presencia de masa glaciar (hielo y nieve) en escenario RCP 8.5, se tendrá una reducción de 25% al caudal de periodo base afectando el suministro de agua en uso agrícola y poblacional en las próximas décadas.

**Palabras clave:** Cordillera Blanca, glaciar Yanamarey, modelización hidro-glaciológica, RS MINERVE, GSM, SOCONT, RCP2.6 y RCP 8.5

### Abstract

*Dry season water resources in the arid tropical Andes are decreasing due to climate change-induced glacier melting. Glacier runoff and melt dynamics were evaluated for the Yanamarey micro-watershed in the Cordillera Blanca of Peru, applying the semi-distributed conceptual approach with the GSM (Glacier Snow Melt) and SOCONT (Soil Contribution) models, which integrates hydro-glaciological processes in glacial and non-glacial zones, for the base period (2013 - 2018) and future (2018 - 2050) with climate change scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5, using daily temperature and precipitation data. In the 5-year base period, the Yanamarey glacier with an average surface area of 0.23 km<sup>2</sup> has an ice melt of 1281509 m<sup>3</sup> and the highest monthly melt flow contribution occurs in November (wet season) and August (dry season). The future scenario of the Yanamarey glacier with CMIP5 climate from RegCM4 regional model, predicts that the ice mass will be completely converted to runoff in August 2030 in RCP 8.5 scenario and October 2036 in RCP 2.6. The result warns that without the presence of glacier mass (ice and snow) in RCP 8.5 scenario, there will be a 25% reduction to the base period flow affecting agricultural and population water supply in the coming decades.*

**Keywords:** Cordillera Blanca, Yanamarey glacier, hydro-glaciological modeling, RS MINERVE, GSM, SOCONT, RCP2.6 y RCP 8.5

1 Area de Evaluación de Glaciares y Lagunas-Autoridad Nacional del Agua, Perú. Distrito de Independencia, Huaraz. Perú. atacsi@ana.gob.pe

2 Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, IGE, 38000 Grenoble, France

3 Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. Universidad s/n, La Molina, Lima 12, Perú.

4 Centre de recherche sur l'environnement alpin, Suisse

## 1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos almacenados en los glaciares de las cordilleras peruanas, situados en las cuencas altas de los Andes tropicales, corren el riesgo de reducirse debido al rápido derretimiento de los glaciares más pequeños y ubicadas a baja altitud (ANA, 2014, Racoviteanu *et al.*, 2008). El ciclo hidrológico de la región probablemente se verá afectado en el contexto del cambio climático debido a la alteración de la intensidad, la distribución temporal y espacial de la precipitación, la escorrentía superficial y la recarga del agua subterránea (Bates *et al.*, 2008). El agua superficial derivada de la cobertura de glaciares ubicadas en las altas montañas está estrechamente relacionada con el desarrollo de las poblaciones andinas a través de usos agrícolas, municipales, así como la generación de energía hidroeléctrica (Bury *et al.*, 2013). Los recursos hídricos derivados de los glaciares peruanos no solo abastecen directamente a las poblaciones rurales circundantes, sino que también proporcionan agua a ciudades importantes del Perú, que afectan directa e indirectamente a millones de personas en todo el país (Chevallier *et al.*, 2011). La disponibilidad cambiante de este recurso requiere la cuantificación del caudal actual y futura para una implementación efectiva de los planes de gestión del agua.

Las evaluaciones actuales de la disponibilidad de agua indican un riesgo significativo para las zonas alto andinas peruanas debido a la reducción drástica y acelerada de la masa de hielo (Burns & Nolin, 2014; Vuille *et al.*, 2008) con tasa de cambio de tamaño intenso en bajas altitudes de pequeñas glaciares con consecuencia a la extinción (Seehaus *et al.*, 2019, Rabatel *et al.*, 2013). Los balances de masa glaciar se ven afectados por las fluctuaciones en la precipitación y la temperatura (Kaser *et al.*, 2003), y se consideran indicadores sensibles del cambio climático en las zonas tropicales (Francou *et al.*, 2013). Tanto en las zonas de acumulación como en ablación del glaciar, las mediciones de balance de masas pueden ser directas (glaciológicas y topográficas) o indirectas (hidrológicas y fotogramétricas) e indican contribuciones de glaciares significativas al caudal tanto en períodos húmedos como secos a lo largo de los Andes (Francou & Pouyand, 2004). La pérdida de hielo ha provocado un aumento inicial y la posterior disminución del caudal durante la estación seca en las cuencas proglaciares de la cordillera Blanca (Baraer *et al.*, 2012).

El cuarto informe de evaluación del Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC) muestra que, durante el siglo XX, los cambios en las precipitaciones de América Latina fueron irregulares, con disminuciones en zonas como el flanco occidental de los Andes y aumentos en otras zonas como el Cono Sur y en algunas zonas geográficas de la Región Andina en Ecuador, Bolivia y Argentina (IPCC, 2007). Estos cambios, junto con el aumento de las temperaturas, están impulsando el deshielo de los glaciares andinos, incluidos los de la cordillera Blanca (IPCC, 2013). Los estudios actuales indican que en los próximos 15 años, los glaciares andinos más pequeños y más bajos podrían desaparecer por completo, lo que afectaría la disponibilidad de agua y la generación de energía hidroeléctrica, mientras que los glaciares más grandes seguirán retrocediendo (Bates *et al.*, 2008; Condom *et al.*, 2012; Escobar *et al.*, 2013; Francou, 2003; Ramírez *et al.*, 2001).

En toda la cordillera Blanca, el ENSO (Oscilación del Sur de El Niño) afecta en gran medida el balance de masa de los glaciares, donde los años de El Niño corresponden a condiciones cálidas y secas y al balance negativo de masas de hielo (Maussion *et al.*, 2015). Durante los años cálidos y secos de ENSO en la región, menos precipitación que cae como nieve en el glaciar ha causado una mayor pérdida de masa (Francou *et al.*, 2000), efectos que pueden prolongarse en el siguiente año ENSO. Sobre la base del patrón de ENSO multidecadal, la región ha experimentado una tendencia global de calentamiento desde principios de la década de 1980 de 0.13 °C/década (S. Schauwecker *et al.*, 2014). Una mayor frecuencia en años de El Niño, junto con las tendencias del calentamiento atmosférico, ha causado una dramática pérdida de hielo en todo el rango de altitud (Rabatel *et al.*, 2013), perdiendo 40.5% de cobertura de glaciar de cordillera Blanca desde 1962 hasta 2020 (AEGL-ANA, 2020). En la cordillera Blanca, los cambios más importantes en la descarga de aguas superficiales ocurren durante la estación seca (mayo a octubre), cuando los glaciares continúan liberando agua de deshielo en ausencia relativa de precipitación (Viviroli *et al.*, 2011; Vuille, 2013).

Los modelos hidro-glaciológico que implica la fusión de glaciar en altas montañas, con una reducción constante de tamaño inducido por el clima son integrado en proyectar dar respuesta con modelo grado día los procesos de cambio en la masa glaciar (Khadka, 2020). Las simulaciones de caudales que

considera la dinámica del hielo pueden pronosticarse bajo múltiples escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que permite las predicciones de contribuciones relativas del caudal, así como del volumen de hielo. En presencia de cambios climáticos globales, los futuros escenarios de derretimiento proporcionan estimaciones del momento de la recesión del caudal hacia un régimen de flujo de agua que no se ve afectado por la influencia del glaciar. Esto tiene implicaciones importantes de respuesta hidrológicas para cuantificar la disponibilidad de recursos hídricos con cambios climáticos en las cuencas correspondientes (Ramírez, 2008) y en toda la cuenca del río Santa.

Debido a que la disponibilidad de datos hidrológicos y glaciológicos del ámbito de estudio es limitada, son necesarios supuestos teóricos y estimaciones que conducen a mayores niveles de incertidumbre, como la interpolación espacial de las variables de temperatura y precipitación en un entorno topográficamente complejo. Estas incertidumbres pueden abordarse con trabajos futuros que mejoren la frecuencia espacial y temporal de las mediciones hidrológicas, glaciológicas y meteorológicas. Cabe señalar que los cambios futuros en la precipitación, tanto en cantidad como en estacionalidad, son difíciles de simular en la cordillera Blanca porque las incertidumbres en los modelos climáticos tienen una capacidad limitada para simular con precisión el ciclo hidrológico mundial (Vuille, 2013). Estas incertidumbres requieren proyecciones diversas de escenarios de cambio climático en términos probabilísticos, y requiere que los modelos climáticos permitan el cálculo de la incertidumbre al estimar la magnitud del aumento de las temperaturas o los cambios en las precipitaciones.

En condiciones de retroceso glaciar continuo, los glaciares generan un aumento temporal de la escorrentía antes de disminuir hacia niveles no glaciares (Mark *et al.*, 2009). El fenómeno del "descarga pico" se ha observado en la subcuenca Querococha de la cordillera Blanca con caudales de glaciares en estación seca en declive y cuando los glaciares han desaparecidos, la descarga debería observar una ligera declinación (Baraer *et al.*, 2012). En este contexto, el presente estudio es lograr representar el comportamiento hidrológico y predecir los caudales futuros en la microcuenca Yanamarey de la cordillera Blanca, utilizando el modelo climático en RCP 2.6 y RCP 8.5. Las simulaciones hidro-

glaciológicas se llevaran a cabo utilizando la plataforma RS Minerve (García *et al.*, 2007). El resultado del modelo se utilizará para cuantificar la disponibilidad de agua en la parte superior de la cuenca del río Santa y en la toma de decisiones por parte de las autoridades del agua y los gobiernos regionales.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

La microcuenca de Yanamarey es una pequeña cuenca glaciar situada al sur de la cordillera Blanca y al noroeste de Perú (Figura 1), de coordenadas del centroide de la microcuenca de 9°39.4' de latitud sur y 77°16.2' de longitud oeste, con una altitud de 4750 msnm. La microcuenca de Yanamarey se encuentra en la naciente de un pequeño valle en la vertiente occidental de la cordillera Blanca, que forma parte de la subcuenca Yanayacu, drenando sus aguas hacia a la laguna Querococha y el río Yanayacu, desemboca al río Santa en el sector norte de la ciudad de Catac, provincia de Recuay que alberga a 195 habitantes (INEI, 2007). La geología de la subcuenca de Yanayacu presenta estratificaciones de rocas sedimentarias, intrusivas y materiales cuaternarios que recubren anteriores formaciones y las edades de las rocas identificadas están comprendidas entre el Jurásico superior y cuaternario (UGRH, 1993).

La microcuenca Yanamarey comprende un área de 1.55 km<sup>2</sup> (altitud mínima ~ 4620 msnm y máxima ~ 5200 msnm), mientras el glaciar Yanamarey tiene una superficie total de 0.29 km<sup>2</sup> según imágenes satelitales del 2012 y se extiende desde 4768 msnm hasta 5200 msnm de altitud (UGRH-ANA, 2015) y comparado con el área glaciar de 1970, ha habido una pérdida de 1.06 km<sup>2</sup> (Hidrandina, 1989) y un retroceso de frente glaciar de 1948 a 2018 de 974 m (AEGL-ANA, 2019). Durante los años 1980 y 1990, el glaciar Yanamarey experimentó una retirada rápida por los eventos de El Niño (López-Moreno *et al.*, 2017). A medida que el glaciar Yanamarey se reduce, las entradas de agua de deshielo a la descarga de la cuenca disminuirán (Baraer *et al.*, 2012). Estudios previos han estimado que 47% de la descarga en la cuenca de Querococha se deriva de las aguas subterráneas durante la estación seca, que dominará cada vez más las contribuciones al caudal en el futuro (Baraer *et al.*, 2009; 2015).

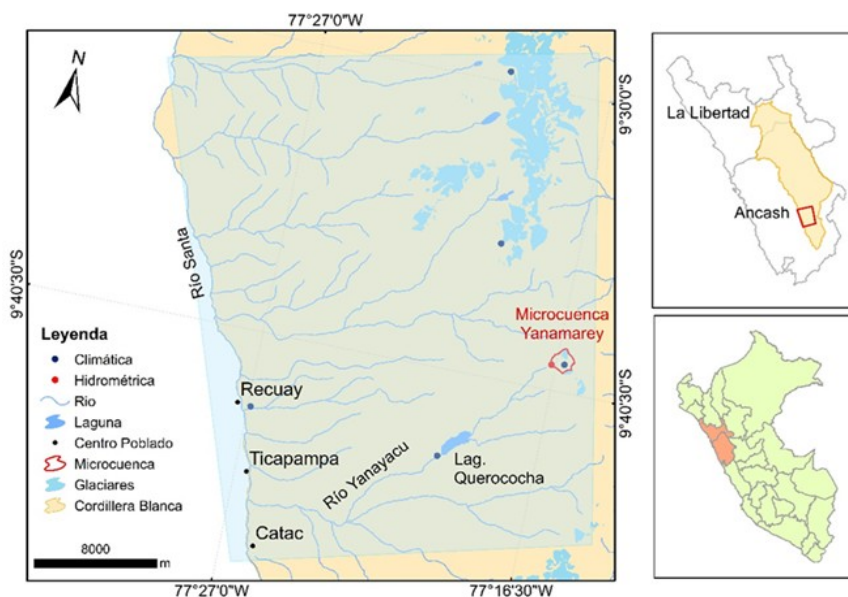


Figura 1. Ubicación del área de estudio de la microcuenca Yanamarey y la posición de estación hidrométrica y climática.

## 2.2 Información disponible

### 2.2.1 Serie de datos históricas

La microcuenca Yanamarey existen datos diarios climáticos e hidrométrico desde el año 2005; pero, existe varios periodos con data incompleta. Para la presente investigación se utilizó datos diarios de precipitación, temperatura y caudal desde octubre de 2013 hasta diciembre de 2018. Además, las

estaciones climáticas existentes en las cuencas cercanas (Uruashraju, Querococha, Shallap y Recuay) se utilizaron para completar los registros faltantes. La serie de datos de precipitación, temperatura y descarga se realizaron control de calidad retirando algunos valores incongruentes, y los registros faltantes se completaron usando un porcentaje de cada estación vecina (Tabla 1).

Tabla 1. Información utilizada de periodo de 2013-2018 para el estudio hidro-glaciológico.

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud msnm	Tipo	Institución	Información utilizada (%)		
						P	T	Q
Yanamarey	9°39.5'	77°16.2'	4698	T, P	ANA	64	72	-
Querococha	9°43.6'	77°20.0'	4012	T, P	ANA		14	-
Uruashraju	9°35.7'	77°19.3'	4693	T, P	ANA	33	8	-
Shallap	9°29.6'	77°20.2'	4965	T, P	ANA	3		-
Recuay	9°43.2'	77°26.9'	3431	T, P	SENAMHI		6	-
Yanamarey	9°39.6'	77°16.6'	4620	Q	ANA	-	-	100

T= temperatura, P= precipitación, Q= descarga

La serie de datos de precipitación y temperatura fue obtenida de una estación pluviométrica de la microcuenca Yanamarey y 04 estaciones pluviométricas cercanas a Yanamarey. Los datos

faltantes de precipitación de toda la estación pluviométrica fue calculada por método de ratios (Alfaro & Pacheco, 2000). En temperatura, se utilizó un gradiente térmico de 0.8°C /100 m para calcular

los valores de temperatura faltantes para cada estación a su altitud correspondiente. Este gradiente de temperatura se considera referencial para la región de cordillera Blanca (Carey *et al.*, 2012). Evapotranspiración potencial (ETP) fue estimado

utilizando Oudin, 2005 (Ecuación 1) para el periodo de evaluación. El método de coeficiente de Oudin fueron aplicado para modelamiento hidrológicos de varias cuencas del mundo (Oudin, 2005).

$$\begin{aligned} \text{ETP} &= \text{CoeffETP} \cdot \frac{\text{Re}}{\lambda \rho} \cdot \frac{T+5}{100} \quad \text{Si } T > -5 \\ \text{ETP} &= 0 \quad \text{Si } T \leq -5 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde

- ETP es evapotranspiración potencial (mm/día)
- R es radiación global extraterrestre (MJ/m<sup>2</sup>/día)
- T la temperatura del aire a 2 m de altura del suelo (°C).

Para evaluar los cambios en la cobertura de masas de hielo, se utilizaron las superficies de glaciares del año 1970 hasta 2018, las que fueron obtenidos con fotografías aéreas (Hidrandina, 1989) e imágenes de satélite Spot 5 y Aster (UGRH-ANA, 2010, 2015) y Landsat 5 TM, 7 ETM y 8. En las imágenes de satélite se identificó el glaciar con la aplicación del índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI) (Dozier, 1989; Hall & Riggs, 2011) y la clasificación supervisada utilizando el análisis espectral con el

algoritmo de distancia mínima y la combinación de bandas RGB visibles. También, se mejoró la delimitación de parte frontal del glaciar Yanamarey con trabajos topográficos (AEGL-ANA, 2019), las que se muestra en la Ecuación 2 y Figura 2. La tendencia decreciente del glaciar continuo es estimable para los años futuros con la ecuación 2; pero los valores reales de tamaño pueden aproximarse con la hidrología según el escenario de clima futura.

$$Y = 150.10 \cdot X^2 - 622863.777X + 645849217.35 \quad (2)$$

Donde

- Y es la cobertura de superficie glaciar (m<sup>2</sup>)
- X es el tiempo (años)

### 2.2.2 Modelo Hidrológico GSM y SOCONT

El programa hidrológico e hidráulico RS Minerve fue empleado en este estudio para simular a la montaña morfológicamente compleja con presencia de hielo y nieve. Los procesos de lluvia-escorrentía son simulado en modo conceptual semidistribuido que satisfactoriamente cuantifica los caudales de fusión de hielo (Qhielo), caudal de fusión de nieve (Qnieve), intensidad infiltrada por lluvia y nieve derretida (Qsubterráneo) e intensidad neta de escorrentía superficial por la lluvia (Qdirecto). Los modelos hidrológicos utilizadas es GSM (Glacier Snow Melt) y SOCONT (Soil Contribution) para cuencas divididas en cuencas, donde las escorrentías se propagan aguas abajo y se suman a la descarga a la salida de la cuenca. En el funcionamiento del modelo GSM y SOCONT, la precipitación se divide en sólida y líquida dependiendo de las temperaturas críticas. La precipitación sólida es la entrada a la rutina de nieve

cuyo contenido variará según los procesos de fusión o congelamiento. La nieve derretida y la precipitación líquida formarán una precipitación equivalente. (García *et al.*, 2019). A la vez, en ambos modelos ocurre una variable crítica del proceso hidroclimático de la transición de la línea lluvia-nieve (Schauwecker *et al.*, 2016), definido a un evento a través de informes sinópticos como el límite instantáneo entre precipitación congelada y no congelada (Croft & Shulman, 2014). Sin embargo, la información relacionada suele faltar en muchas regiones montañosas debido a la falta de mediciones in situ (Rohrer *et al.*, 2013) y la estimación de línea de lluvia-nieve con datos de temperaturas son precisa solo dentro de unos pocos cientos de metros de altura, lo que puede cubrir el 10-20% de algunas cuencas (Kattelmann, 1997). Siendo, una aproximación a línea de lluvia-nieve en Rs Minerve utiliza la temperatura mínima crítica para



precipitación líquida y temperatura máxima crítica para precipitación sólida (García *et al.*, 2019). En caso de modelado de balance de masa de la capa de nieve estacional y el glaciar, el límite de deposición

de la nieve constituye una variable decisiva por las precipitaciones sólidas contribuyen a la acumulación y la lluvia contribuye a la escorrentía (Schauwecker, 2016), lo cual no es parte en esta investigación.

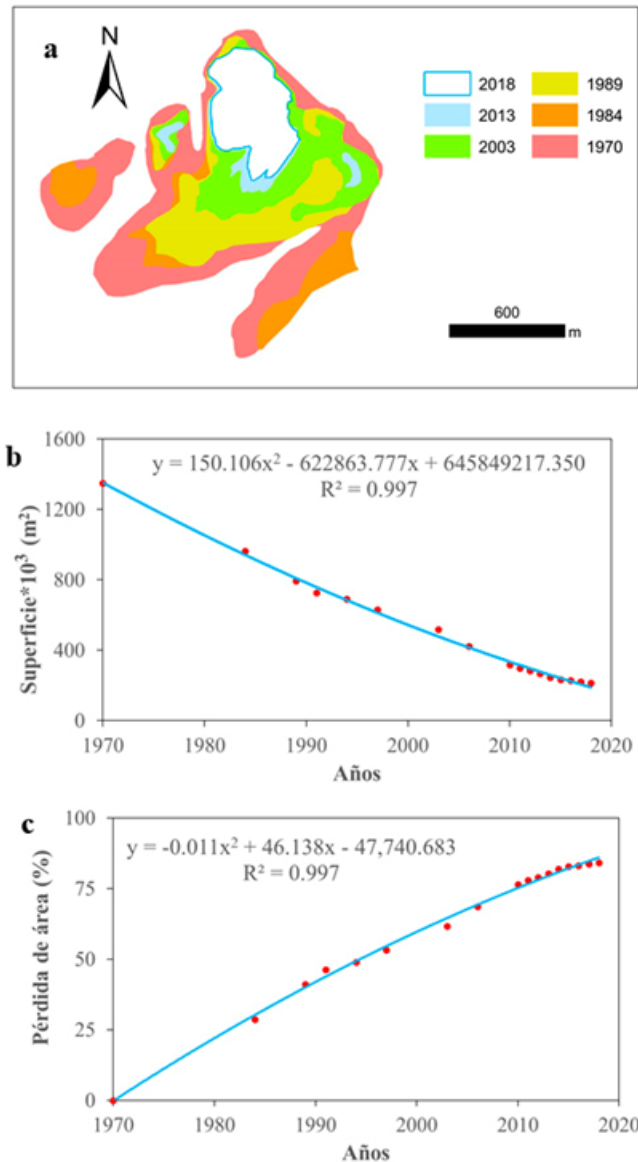


Figura 2. (a) Límite de glaciares de Yanamarey de los años 1970, 1984, 1989, 2003, 2013, 2018. (b) Ploteo de los valores de superficie entre los años 1970 y 2018. (c) Ploteo de la reducción de área entre 1970 y 2018.

Para la aplicación de RS Minerve se ha asociado los elementos hidrológicos GSM y SOCONT a las bandas de altitud distribuidos en las cuencas que recoge la contribución de los diferentes caudales en su punto de desagüe (García *et al.*, 2019). El área consta de tres cuencas, agrupadas en zonas de áreas homogéneas por pendiente y dinámica del hielo. La zona glaciar consta de 4 elementos de GSM,

agrupadas en parte baja (G1, G2) y parte alta (G3, G4), En la zona no-glaciar se han creado de 06 elementos de SOCONT definido en parte baja (S1, S3, S5) de pendiente moderada (8-25%) de suelo limpio y parte alta (S2, S4, S6) de pendiente empinada (50-75%) con presencia de roca fractura (Figura 3).

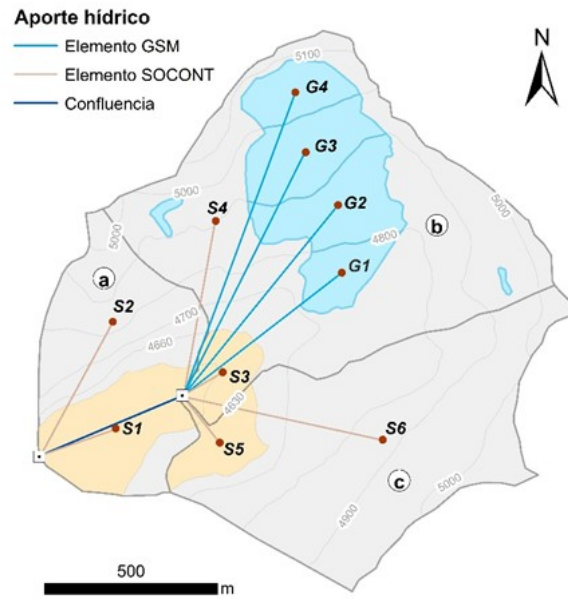


Figura 3. Representación del modelo hidro-glaciológico definido en bandas de altitud en las tres cuencas (a, b, c) del año 2015.

### 2.2.3 Proyección de clima futuro

En la simulación de cambio climático del glaciar Yanamarey se utilizó datos diarios de temperatura y precipitación del modelo NCAR-CCSM3, adecuado en modelo regional RegCM4 de SAM-44i-MPI-ESM-MR en RCP 2.6 y RCP 8.5. Es un modelo climático regional de la atmósfera y la superficie

continental de área limitada y alta resolución espacial que puede ser localizado en cualquier parte del globo. Y es bastante aceptable para Sudamérica (Falvey, 2018). Los escenarios seleccionados permiten evaluar los cambios hidro-glaciológicos de Yanamarey en escenarios futuros (IPCC, 2013).

Tabla 2. Modelo regionalCM4 SAM-44i-MPI-ESM-MR, empleada en la presente investigación.

Modelo	Modelo regionalCM4	Institución	Resolución
NCAR-CCSM3	SAM-44i-MPI-ESM-MR	International Center for Theoretical Physics (ICTP), Italia y Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC), Chile.	10 km

### 2.3. Evaluación de variables y parámetros del modelo

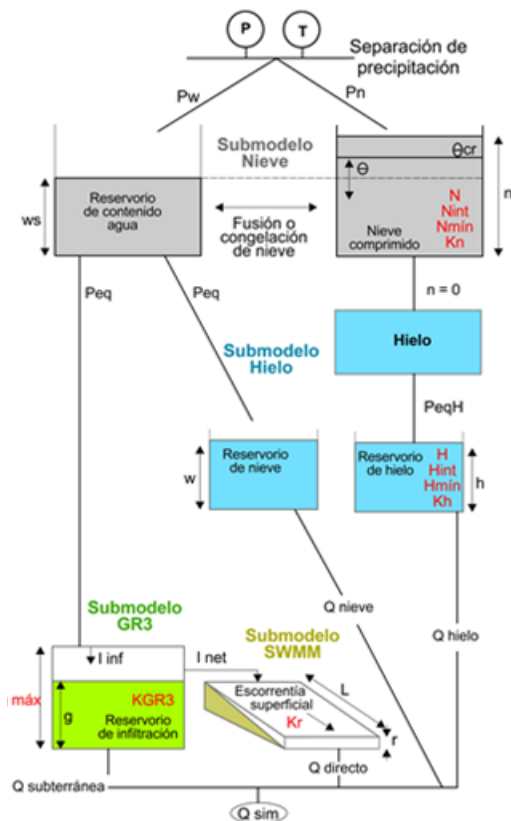
El modelo GSM constituyen dos submodelos nieve y 3 submodelos hielo y el modelo SOCONT articula en serie a cuatro submodelos hidrológicos de menor complejidad: dos submodelos nieve, un submodelo GR3 y un submodelo SWMM (Storm Water Management Model) (García *et al.*, 2019) (Figura 4).

El submodelo de nieve se compone definido por precipitación sólida (Pn) y precipitación líquida (Pw), en función de la temperatura (T). La precipitación sólida es la entrada a nieve comprimido, variando su

contenido en función de factor de fusión o la acumulación de nieve (N) y precipitación líquida con el ingreso de fusión de nieve produce la precipitación equivalente (Peq) del reservorio de contenido en agua. En el modelo GSM, el submodelo hielo recibe datos de entrada de submodelo nieve de: a) precipitación equivalente (Peq) al reservorio de nieve que sale de la cuenca (Q nieve), b) flujo de hielo (PeqH) cuando la altura de la nieve es cero, es producto de factor de fusión de glaciar (H) almacenando en reservorio hielo lo que drena de la cuenca (Q hielo) (García *et al.*, 2019). En el modelo SOCONT, Peq producido en submodelo de nieve,

ingresa como dato de entrada al submodelo GR3, que calcula la intensidad de infiltración ( $I_{inf}$ ), la evapotranspiración potencial (ETP), la intensidad neta ( $I_{net}$ ) y caudal subterráneo. Y la intensidad neta es el flujo de escurrimiento superficial considerando el coeficiente Strickler ( $K_r$ ) (García et al., 2019). Los dos modelos requieren la extensión de la superficie del glaciar como variable de entrada en el período de simulación. Catorce parámetros son utilizados para calibrar el modelo GSM y SOCONT, siendo:  $N$  y  $H$  ( $\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{día}$ ) coeficiente nieve y hielo;  $N_{int}$  y  $H_{int}$

( $\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{día}$ ) coeficiente de intervalo de fusión nieve y hielo;  $N_{mín}$  y  $H_{mín}$  ( $\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{día}$ ) coeficiente mínimo de fusión de nieve y hielo;  $T_{cp1}$  y  $T_{cp2}$  ( $^\circ\text{C}$ ) temperatura mínima y máxima para precipitación líquida;  $T_{cf}$  ( $^\circ\text{C}$ ) temperatura crítica de la nieve;  $K_n$  (1/d) coeficiente de liberación de fusión de nieve;  $K_h$  (1/d) coeficiente de liberación de fusión de hielo;  $g_{Max}$  (m) altura máxima de infiltración;  $K_{GR3}$  (1/s) coeficiente de liberación de infiltración y  $K_r$  ( $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ) coeficiente de Strickler.



#### Variables de simulación

- P: Precipitación
- T: Temperatura
- Pw: Precipitación líquida
- Pn: Precipitación sólida
- Peq: Precipitación equivalente
- PeqH: Precipitación equivalente de hielo
- n: Altura de nieve
- ws: Altura de contenido de agua
- $\Theta$ : Contenido de agua en la nieve acumulada
- $\Theta_{cr}$ : Contenido crítico de agua en la nieve acumulada
- g: Nivel de agua en el reservorio de infiltración
- $I_{inf}$ : Intensidad de infiltración
- $I_{net}$ : Intensidad neta
- L: Longitud de plano
- Q hielo: Caudal de hielo
- Q nieve: Caudal de nieve
- Q subterránea: Caudal de GR3
- Q directo: Caudal de SWMM
- Q sim: Caudal total

#### Parámetros de calibración

- N, H:** Coeficiente de fusión de nieve y hielo ( $\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{día}$ )
- $N_{int}$ ,  $H_{int}$ :** Coef. de intervalo de fusión de nieve y hielo ( $\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{día}$ )
- $N_{mín}$ ,  $H_{mín}$ :** Coef. mínimo de fusión de nieve y hielo ( $\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{día}$ )
- $T_{cp1}$ :** Temperatura crítica mínima para precipitación líquida ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_{cp2}$ :** Temperatura crítica mínima para precipitación sólida ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_{cf}$ :** Temperatura crítica de fusión de nieve ( $^\circ\text{C}$ )
- $K_n$ :** Coef. De liberación de fusión de nieve (1/d)
- $K_h$ :** Coef. De liberación de fusión de hielo (1/d)
- $g_{máx}$ :** Altura máxima de infiltración (m)
- $K_{GR3}$ :** Coeficiente de liberación de infiltración (1/s)
- $K_r$ :** Coeficiente de Strickler ( $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ )

Figura 4. Esquema conceptual de GSM y SOCONT. Fuente: García et al., 2019.

#### Calibración y validación de modelo GSM y SOCONT

En la simulación de recursos hídricos proveniente de glaciares se consideró constante durante todo el período de simulación a corto plazo (cinco años) donde los cambios de geometría del perímetro del glaciar es bastante pequeño, aunque esta suposición es una simplificación de la compleja dinámica glaciar (Schaeffli et al., 2005) y la simulación de los modelos de lluvia-escorrentía GSM y SOCONT fue desarrollada con registro diario de una serie de precipitación, temperatura y caudal.

La calibración de caudales en el modelo GSM y SOCONT se obtuvo de manera iterativa de los valores de los parámetros hasta alcanzar la eficiencia de la función objetivo seleccionado. Esta optimización se ha llevado a cabo en un sorteo aleatorio de 950 combinaciones de parámetros de GSM ( $N$ ,  $H$ ,  $N_{int}$ ,  $N_{mín}$ ,  $H_{int}$ ,  $H_{mín}$ ,  $K_n$ ,  $K_h$ ), 710 combinaciones en SOCONT ( $g_{max}$ ,  $K_{GR3}$  y  $K_r$ ) y 200 combinación de parámetros ( $T_{cp1}$ ,  $T_{cp2}$  y  $T_{cf}$ ), que permitió identificar la mejor combinación de parámetros. También se ha utilizado con éxito con el

modelo GSM y SOCONT para otros estudios (Muñoz, 2017).

Para la calibración del modelo; sugiere (Marek *et al.*, 2016; Bodian *et al.*, 2018) que: (1) dividir el periodo en dos partes iguales y (2) 2/3 partes en calibración y 1/3 en validación. En esta investigación se utilizó el segundo método; se consideró dos periodos de período de calibración (agosto de 2013 al septiembre de 2016) y la validación (octubre de 2016 al diciembre de 2018).

Los dos modelo fueron calibrados con el método Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA) (Duan *et al.*, 1994; García *et al.*, 2019)

que optimiza una función multiobjetivo de sucesivas combinaciones de parámetros convergen en una solución. La función objetivo se midió con los indicadores estadísticos de Nash (NSE), Nash-Ln (NSE-LN), Pearson (PCC) y Error Pico Normalizado (NPE), los cuales ha sido aplicado a varios estudio hidrológicos (García *et al.*, 2019). En la función multiobjetivo, se priorizaron a los cuatros indicadores con pesos de 40% (NSE), 20% (NSE-LN), 20% (PCC) y 20% (NPE). Este proceso nos permite elegir los parámetros que mejor reflejan la relación lluvia-escorrentía. Una vez que el modelo fue calibrado y validado, hemos simulado el caudal en la estación Yanamarey en un futuro cercano a escala diaria.

Tabla 3. Los criterios de calibración hidrológica

Criterio	Formula	Escala	Valor ideal
NSE	$1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - X_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{ref,t} - \bar{X}_{ref})^2}$	$-\infty, +\infty$	1
NSE-LN	$1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(X_{sim,t}) - \ln(X_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(X_{ref,t}) - \ln(\bar{X}_{ref}))^2}$	$-\infty, 1$	1
PCC	$\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - \bar{X}_{sim}) \cdot (X_{ref,t} - \bar{X}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{sim,t} - \bar{X}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_f} (X_{ref,t} - \bar{X}_{ref})^2}}$	$-1, 1$	1
NPE	$\frac{S_{max} - R_{max}}{R_{max}} \quad S_{max} = \bigvee_{t=t_i}^{t_f} Q_{sim,t} \quad R_{max} = \bigvee_{t=t_i}^{t_f} Q_{ref,t}$	$-1, +\infty$	0

Xsim,t: variable simulado, Xref,t : variable observado, Xref: promedio de variable observado, Xsim: promedio de variable simulado, Smax : valor máximo simulado, Rmax : Valor máximo observado.

## 2.4 Construcción de escenarios climáticos

### Descripción de escenarios de cambio climático

Para la predicción del impacto de cambio climático en la microcuenca glaciar de Yanamarey, se utilizó el quinto informe del IPCC considera escenarios denominados "rutas de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés)", definidas como RCP 2.6 W/m<sup>2</sup>, RCP 4.5 W/m<sup>2</sup>, RCP 6.0 W/m<sup>2</sup>, RCP 8.5 W/m<sup>2</sup>, que representan las proyecciones de forzamiento radiactivo totales y no solo para los factores socioeconómicos, sino también para los cambios de política a través de tiempo (Moss *et al.*, 2010; Taylor *et al.*, 2012). En comparación con el escenario de emisiones del informe especial (SRES) utilizado en el cuarto informe de evaluación del IPCC (AR4), RCP8.5 es ampliamente comparable al escenario SRES A2 / A1FI, RCP6.0 a B2 y RCP4.5 a

B1. Para RCP2.6, no existe un escenario equivalente en SRES (Taylor *et al.*, 2012). En este presente estudio, se utilizó RCP 2.6 y RCP 8.5.

### Reducción de la escala de los modelos climáticos globales al nivel de cuencas hidrográficas

Los Modelos Climáticos Globales (GCM) proveen información a baja resolución, de unos 100 a 200 km y modelo climático regional versión 4 (RegCM4) para Sudamérica de 50 km (Falvey, 2018). El tamaño de grilla en la que los impactos climáticos ocurren requiere menor tamaño (Maraun *et al.*, 2010; USAID, 2014). Debido a las escalas gruesas, no se recomienda utilizar directamente la salida de GCM para estudios de impacto hidrológico (Teutschbein *et al.*, 2011; Bodian *et al.*, 2018). Hay dos métodos principales de reducción de escala: dinámico y estadístico. El downscaling estadístico realiza

relaciones estadísticas entre la información climática a gran escala y las variables locales (Teutschbein *et al.*, 2011). Mientras que, en el downscaling dinámico, se fuerza un modelo climático de mayor resolución o un modelo climático regional mediante el uso de un GCM (Setegn *et al.*, 2011). En esta investigación hemos aplicado el escalamiento dinámico. El escalamiento se ha utilizado ampliamente en estudios de hidrología y gestión del agua (Hamlet *et al.*, 2013). Esta técnica supone que la relación entre las variables climáticas a gran escala (predictores-x) y la variable real medida (predictando-y) siempre será la

misma (Fang *et al.*, 2015): por lo que realizó la corrección de sesgo estadístico para que coincida mejor el resultado del modelo con las observaciones. Para este método, se calculó el promedio de las series simuladas y observadas durante el período de referencia (2013-2018), y luego se computaron los ajustes diarios que permitirían construir los escenarios proyectados. Esto se hizo aplicando las ecuaciones (3), la precipitación diaria y la temperatura diaria simuladas para el período de 2018 – 2050.

$$P_{cor, m, d} = P_{raw, m, d} \times \frac{\mu(P_{obs, m})}{\mu(P_{raw, m})} \quad (3)$$

$$T_{cor, m, d} = T_{raw, m, d} + \mu(T_{obs, m}) - \mu(T_{raw, m}) \quad m: \text{mes } d: \text{ día.}$$

Donde

Precipitación (mm)  
T es temperatura (°C)

### 2.5 Herramienta GlabTop para glaciares

Una respuesta del glaciar en el modelo GSM son los deshielos que representan los cambios del volumen y altura en el paso del tiempo. Siendo las alturas calculadas en cada banda de altitud permiten relacionar el relieve del glaciar que se genera en años posteriores. La herramienta utilizada es GlabTop

(Linsbauer *et al.*, 2012), que requiere datos de entrada del contorno glaciar, un modelo de elevación digital (DEM) y las líneas de drenaje de agua sobre el glaciar, para calcular el espesor promedio del hielo ( $h_f$ ) en relación con la pendiente del terreno (Frey *et al.*, 2014), que multiplicado con la superficie del glaciar se obtiene el volumen.

$$h_f = \frac{\tau}{f\rho g \sin \alpha} \quad (4)$$

Donde

$\tau$  es el esfuerzo cortante basal a lo largo de la línea de flujo central

f es un factor de forma de 0.8 para glaciar de valle

g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$\alpha$  es la pendiente media del glaciar

$\rho$  es la densidad del hielo (900 kg/m<sup>3</sup>)

$\tau$  es estimado de análisis empírico según rango de elevación ( $\Delta H$ ) (Haeberli & Hoelzle, 1995; Linsbauer *et al.*, 2012).

$$\begin{aligned} \tau &= 0.005 * 1.598 \Delta H - 0.435 \Delta H, & \Delta H < 1600 \text{ m} \\ \tau &= 1500 \text{ kPa}, & \Delta H > 1600 \text{ m} \end{aligned} \quad (5)$$

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Calibración de modelo hidrológico

Los valores de los indicadores estadísticos según la función objetivo se presentan en las Figuras 5-a. Los valores de Nash son superiores a 0.79 tanto para la calibración como la validación. El modelo tiende a

subestimar ligeramente los caudales altos con un error de pico normalizado cercano a cero. Estos períodos también dan los mejores valores de Nash-Ln de 0.82 de calibración y 0.84 de validación. Por lo tanto, elegimos los 14 parámetros del período de calibración para la microcuenca Yanamarey, los que deberán usarse para extrapolar al futuro.

En la Figura 5-b, se muestra el hidrograma mensual para el período de 2013 a 2018 de los aportes de caudales de hielo, nieve, directo y subterráneo del año hidrológico en la microcuenca de Yanamarey. Resultando, los mayores aportes de fusión de hielo se han producido en los 04 meses finales del año, correspondiendo un caudal de 12 l/s (23%) en el mes de septiembre, 15 l/s (23%) en octubre, 19 l/s (22%) en noviembre y 16 l/s (15%) en diciembre; mientras, la mayor fusión de nieve es entre los meses de enero a marzo de caudal promedio 28 l/s y el mayor caudal del agua subterránea de 39 l/s (24%) en el mes de marzo. Asimismo durante el año, la contribución anual total del fusión de hielo en la microcuenca de Yanamarey es del 9%, lo que está de acuerdo con la estimación previas del 10% de Mark & Seltzer (2003). A la vez, la fusión del hielo contribuye con el

12% del caudal durante la estación seca (mayo-octubre), mientras que en la estación húmeda (noviembre-abril) las contribuciones relativas de la fusión del hielo es 7%. En lo que respecta a los dos meses más seca (agosto y setiembre), las contribuciones relativas en fusión de hielo es 24% del total, fusión de nieve es 13% y subterránea el 25%. La contribución subterránea relativamente baja es por ubicarse en pendiente empinada ocupada de roca fracturada en 60% de la superficie de microcuenca Yanamarey, que produce un rápido escurrimiento de la lluvia. la que no ocurre aguas abajo a 4 km (microcuenca Querococha) donde la cobertura de suelo ocupa casi 65% de la microcuenca generando un aporte subterráneo de 47% del total (Baraer *et al.*, 2009).

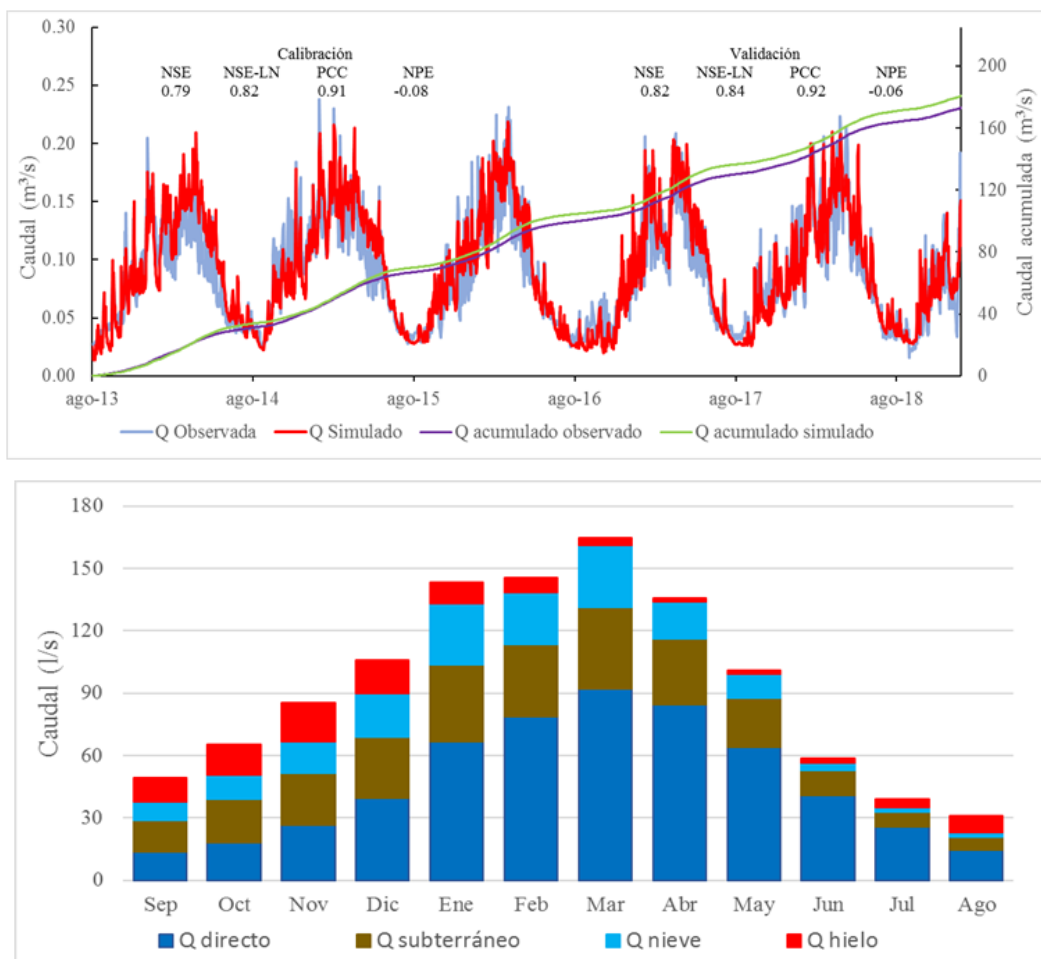


Figura 5. Comparación de hidrograma de caudales diarios observados y simulado con GSM y SOCONT en la estación Yanamarey (NSE es coeficiente de Nash Sutcliffe, NSE-LN es coeficiente de Nash para Logaritmos, PCC es coeficiente de correlación Pearson y NPE es Error Pico Normalizado). b) Hidrograma medio mensual de caudales promedios simulado según clima reconstruido del año 2013 al 2018 en la microcuenca Yanamarey.

En la Figura 6, se presentan la evaluación de las características de los parámetros hídricos para periodo de agosto 2013 a diciembre de 2018 que son la proporción de los mismos provenientes de la zona glaciar y no glaciar de la microcuenca Yanamarey. En la zona glaciar, las dimensiones de alturas de fusión de hielo varían según las bandas de altitud, alcanzando 12 m en la banda G1 y 2 m en la banda G4; siendo, esta diferencia de 10 m por ubicarse en la parte baja se produce deshielo y parte alta se almacena la nieve. En tanto, en las alturas de nieve que se acumulan en la temporada de lluvia sobre el glaciar es bastante mayor en la banda (G3 y G4) llegando hasta 14 cm y la zona (G1 y G2) solo 5 cm.

Y el volumen de fusión de hielo derretido 5 años hidrológicos es mayor en 2015-2016 de 367851 m<sup>3</sup> (368\*10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>) y totaliza de 1281509 m<sup>3</sup>. Mientras en la zona no-glaciar, la precipitación sólida (nieve) en la época húmeda se acumula en mayor magnitud en la parte alta alcanzando un máximo de 6.5 cm y parte baja de 2 cm; la altura de infiltración en zona de suelo desnudo de pendiente moderada (8-25% de inclinación) almacena hasta 40 cm de agua y sector de roca fractura de pendiente empinada (50-75%) alcanza casi 5 cm; y en lámina de agua en la superficie por precipitación se aprecia en promedio de 1.6 m en roca fracturada y 0.03 m en sector de suelo limpio.

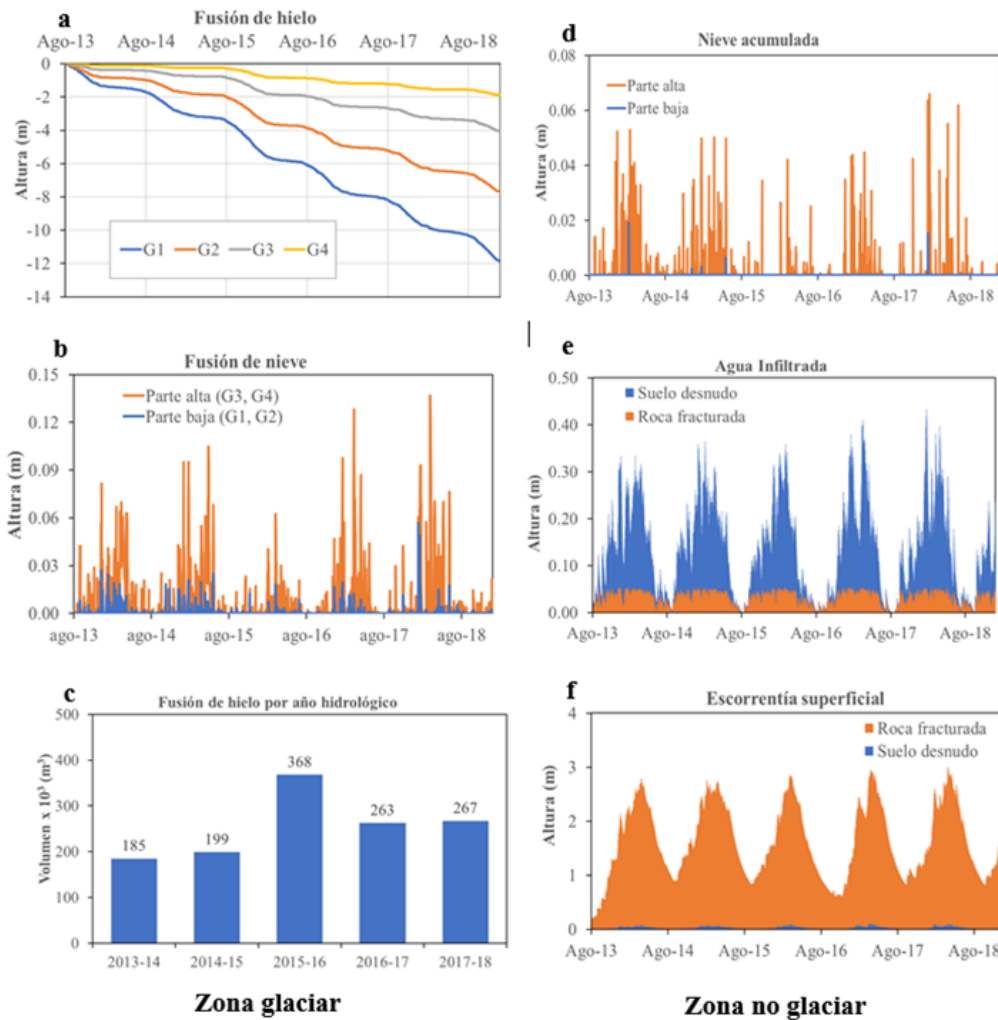


Figura 6. Evaluación de los parámetros hídricos entre los años 2013 a 2018 de: a) altura de fusión de hielo según bandas de altitud. b) altura de nieve acumulada sobre el hielo. c) volumen de fusión de hielo por año hidrológico (de setiembre a agosto del siguiente año). d) altura de nieve acumulada en zona no-glaciar, e) altura de agua infiltrada en reservorio de suelo y roca fracturada. f) altura de escorrentía de agua en zona no-glaciar.

### 3.2 Disponibilidad hídrica del glaciar al año 2018

Con la finalidad de conocer la masa de hielo que queda para los futuros años, se calcula el volumen de hielo del mes de setiembre de 2018 según el relieve topográfico del glaciar definido del DEM. Debido que el DEM del 2018 no es disponible en la web, primero se obtuvo el volumen según el modelo GlabTop (Linsbauer *et al.*, 2012) para el año 2016 con TanDEM de resolución espacial de 10 m (Zink *et al.*, 2011; Seehaus *et al.*, 2019), para una superficie de 227,376 m<sup>2</sup> que representa el volumen de hielo de 1723434 m<sup>3</sup> que multiplicada con la densidad (0.9

g/cm<sup>3</sup>) permite obtener el volumen de agua equivalente (Figura 7-a). Segundo, se calculó con modelo hidro-glaciológico el volumen de fusión de hielo de dos años (setiembre 2016 a agosto 2018) que representa de 525,286 m<sup>3</sup>. La diferencia de volúmenes, resulta de 1,198,148 m<sup>3</sup> ± 30% de agua equivalente para una superficie de hielo de 0.21 km<sup>2</sup> del año 2018 (Figura 7-b) y se distribuyen los volúmenes y espesor promedio de hielo en las cuatro bandas de altitud, las que será utilizado para evaluar su comportamiento futuro.

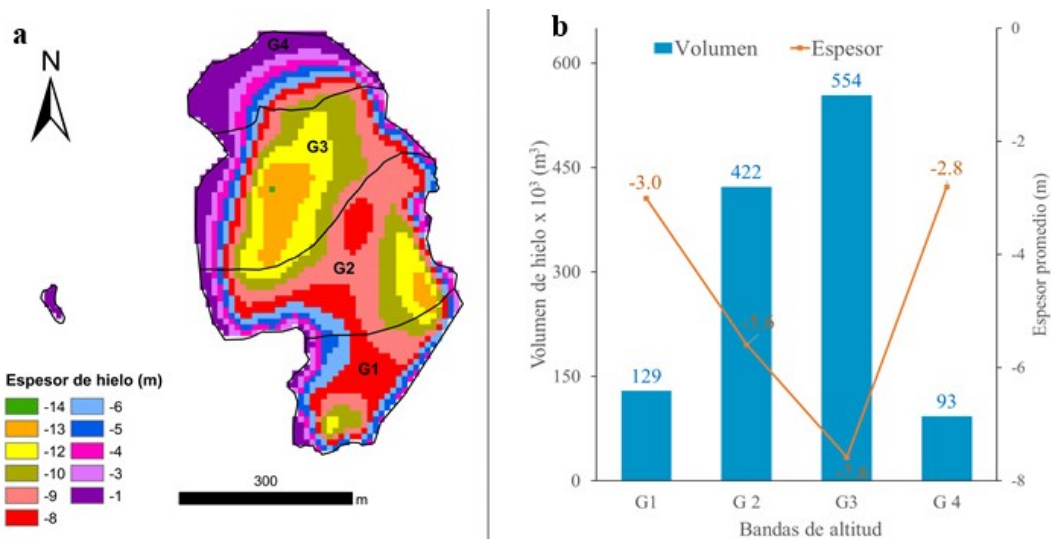


Figura 7. (a). Espesor de hielo en banda de altitud (G1, G2, G3, G4) para el volumen de glaciar Yanamarey - año 2016, obtenido del modelo GlabTop. (b) Distribución de volumen y espesor promedio de hielo del mes de setiembre de 2018

### 3.3. Evolución de volumen del glaciar por cambio climático

La evolución de reducción de volumen del glaciar Yanamarey se evalúan para el periodo 2018-2050 con los parámetros hídricos determinadas en la calibración del modelo GSM y SOCONT y las proyecciones climáticas diarias de precipitación y temperatura del CMIP5 adecuado en modelo regional RegCM4 de SAM-44i-MPI-ESM-MR en los escenarios RCP 2.6 (optimista) y RCP 8.5 (pesimista). En la simulación de escenarios futuros en Rs Minerve, la superficie glaciar cambia continuamente en el paso del tiempo y para salvar este inconveniente se asumió el incremento de espesor de hielo y disminución el área glaciar en 50% manteniendo constante el volumen; con este artificio

se aproxima de manera equivalente el comportamiento dinámico del glaciar del adelgazamiento continuo del espesor de hielo hasta llegar a valor cero para convertirse en superficie no-glaciar (Muñoz, 2017) y de esta manera se produce el agotamiento de la reserva hídrica glaciar. En la Figura 8, se muestra la evolución de los volúmenes de hielo y volumen anual de año hidrológico bajo los escenarios de cambio climático. El escenario RCP 8.5, en varios años los volúmenes anuales de hielo superan a RCP 2.6; lo que genera una reducción acelerada y por consiguiente la fecha de desaparición del glaciar en escenario pesimista es agosto 2030 y el escenario optimista en octubre de 2036. Además, la tasa de pérdida de volumen del glaciar en el año hidrológico de 66,564 m<sup>3</sup>/año en el escenario RCP 2.6 y 92165 m<sup>3</sup>/año en RCP 8.5.



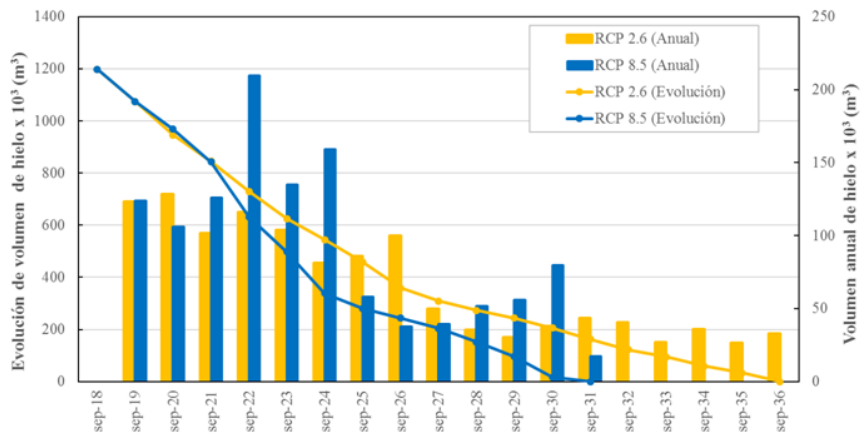


Figura 8. Comportamiento de volumen de fusión de hielo a escenario RCP2.6 y RCP85

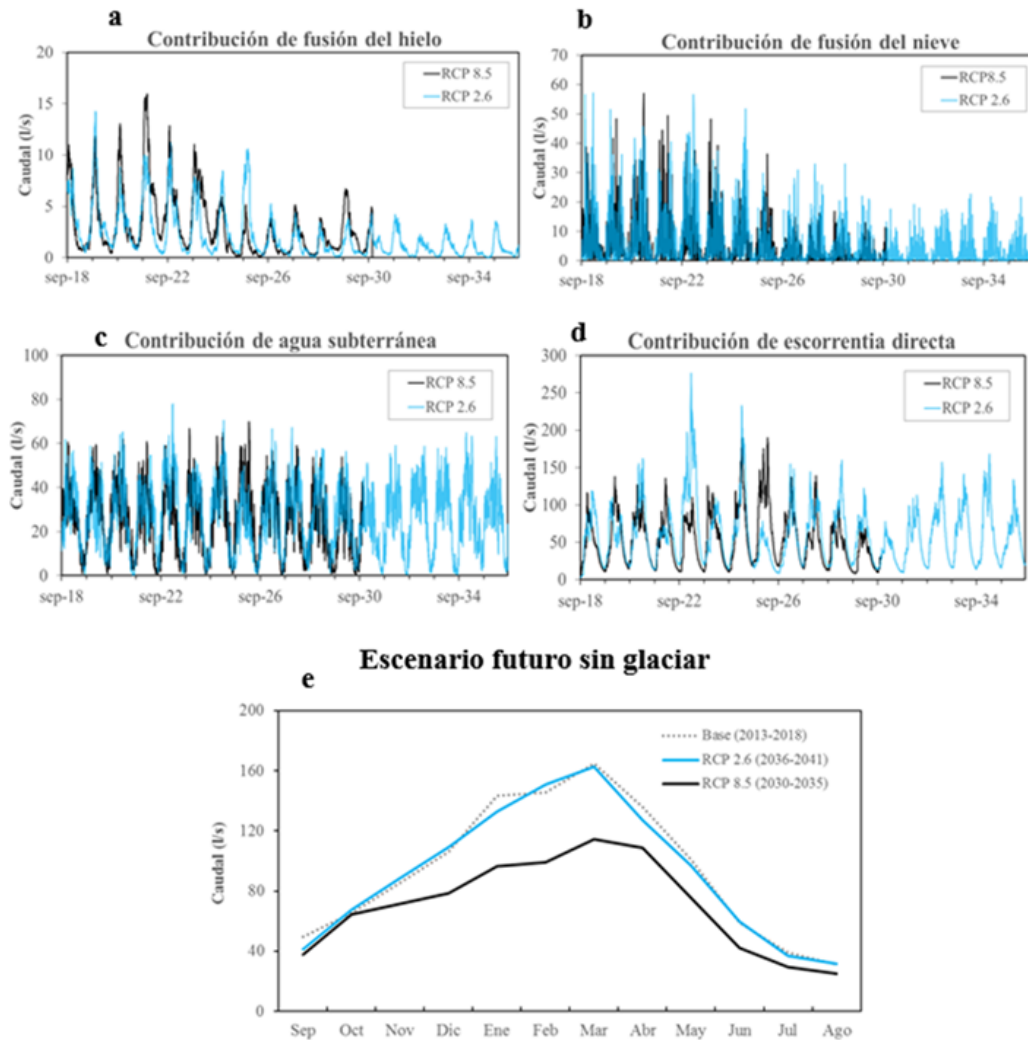


Figura 9. Escenario futuro de glaciar con contribución diario de: (a) fusión de hielo, (b) fusión de nieve, (c) agua subterránea, (d) directo (precipitación). (e) Escenario futuro sin glaciar de contribución mensual comparada al periodo base. Ambos escenarios con RCP 2.6 y RCP 8.5.

### 3.4. Contribución de caudales en horizonte futuro con cambio climático.

La contribución de los caudales futura se analiza desde setiembre 2018 hasta la desaparición del glaciar en la microcuenca Yanamarey con los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. (Figura 9). En el comportamiento de hidrograma de caudales, las mayores fusiones de hielo corresponden a los meses de octubre y noviembre, iniciando una tendencia creciente en RCP 2.6 desde el año 2018 hasta 2019 (14.2 l/s) y en RCP 8.5 desde 2018 hasta 2021 (15.9 l/s); luego, comienzan a disminuir sus caudales casi 1.5 veces más rápido en RCP 8.5. En tanto, el caudal de la fusión de la nieve decrece ligeramente mayor en RCP 8.5 lo cual es razonable por la reducción gradual del tamaño del glaciar con el aumento de la temperatura. En concerniente a la contribución de caudal directa (lluvia) y caudal de agua subterránea (base) muestra tendencias variados, lo que podría estar relacionado con las fluctuaciones de las precipitaciones. Al evaluar del futuro de la microcuenca Yanamarey sin la presencia de glaciares, la contribución de caudales superficial y subterráneo será por la lluvia (líquida y sólida); donde el hidrograma de caudales del año hidrológico respecto al año base, presenta en escenario optimista de caudales decreciente anual de 2% (casi similares en varios meses) y en el escenario pesimista con reducción anual de 25%. Y la vez en RCP 8.5, la reducción de caudales en estación seca es 23% y estación húmeda de 26%.

## 4. CONCLUSIONES

Este artículo ha examinado a la microcuenca Yanamarey con presencia glaciar de reducción constante el comportamiento hidro-glaciológico, mediante la simulación escalonada para periodo cortos con los modelos GSM y SOCONT de condiciones actuales y futuros bajo la influencia de cambio climático. Los resultados de investigación demuestran que los volúmenes de la fusión de hielo y nieve producidos en las altas montañas son de utilidad para los pobladores cercanos a la cuenca y la reducción paulatina de sus caudales provocará riesgos en el aprovechamiento de agua en el futuro.

De simulado del periodo base, la microcuenca Yanamarey de superficie glaciar promedio de 0.23 km<sup>2</sup>, produce en la estación húmeda el mayor aporte hídrico es el mes de marzo de 165 l/s, distribuidos

con un caudal directo de 92 l/s (56%), caudal de fusión de nieve de 30 l/s (18%) y caudal de agua subterránea de 39 l/s (24%) y en el mes de noviembre la fusión de hielo alcanza 19 l/s (22%). A la vez; durante los meses de noviembre a abril, las aportaciones de nieve derretida superan a las del hielo en 10%. Mientras, en la estación seca, la fusión de hielo alcanza 25% de caudal del mes agosto y la fusión de glaciar (hielo y nieve) el 41% de caudal en el mes de setiembre y octubre. Además, en la transición de estación húmeda a seca, la fusión de hielo llega casi 2% del mes. En la evaluación de la zona glaciar según bandas de altitud, la altura de fusión de hielo es cuatro veces en la parte de ablación, la altura depositada de la nieve es siete veces en parte de acumulación y el mayor volumen por la fusión de hielo coincide a la presencia de El Niño del año 2015 a 2016 y totaliza del periodo base de 1,281,509 m<sup>3</sup>. Mientras, en la zona no-glaciar, la altura máxima de acumulación de nieve es cuatro veces mayor en parte alta, la altura de agua promedio de infiltración es 4.3 veces en la parte baja y la lámina de escurrimiento es 30 veces en roca fractura.

La simulación de las condiciones hidro-glaciológicas futuras del glaciar Yanamarey se inició del setiembre 2018 de superficie de 0.21 km<sup>2</sup> y volumen 1198148 m<sup>3</sup>, con clima SAM-44i MPI-M-MPI-ESM-MR, indican que se llegan a extinguirse en escenario pesimista (RCP 8.5) el mes de agosto 2030 y escenario optimista (RCP 2.6) en octubre del año 2036, esta diferencia de años es debido a 1.5 veces la fusión de hielo en RCP 8.5. En los 02 escenarios los aportes hídricos del glaciar van disminuyendo en razón a la reducción del tamaño de masa de hielo; mientras, el caudal directo y subterráneo de variaciones similares está relacionado a la precipitación. La asunción de área de glaciar de 50% en la simulación futura puede generar sobreestimación de caudales en ambos modelos GCM y SOCONT y para mejorar la estimación de los caudales es realizar la simulación a paso de tiempo corto (dos años aproximadamente) para ir cambiando las áreas de glaciar y no glaciar. Finalmente, cuando no existan los glaciares, en RCP 8.5 se tendrá una reducción del 25% en el suministro de agua, afectando en el uso de agricultura y agua potable para las próximas décadas. De manera similar, la cuenca de Santa continuará disminuyendo gradualmente los flujos de agua debido a la desaparición de la masa de pequeños glaciares en la cordillera Blanca. Esta investigación ha intentado conocer la respuesta de

banda de altitud con la fusión hielo y la nieve que existe en la pequeña cuenca de la cordillera Blanca. Sin embargo, los resultados obtenidos de contribución hídrica futura puedan tener incertidumbre por los datos de modelo de clima elegido y debe manejarse referencialmente para la implementación de la gestión de los recursos hídricos.

#### *Agradecimiento*

Los autores de este artículo agradecen a la Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua por proporcionar los datos hidrometeorológicos. Asimismo, agradecemos al IRD de Francia por el apoyo financiero y al CREALP por la asesoría técnica.

#### **REFERENCIAS**

- AEGL-ANA. (2019). Retroceso glaciar 1948-2019-Blanca.pdf. Area de Evaluación y Glaciares y Lagunas-ANA, 51. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3770>
- AEGL-ANA. (2020). Cuantificación de glaciares de la cordillera Blanca. Area de Evaluación de Glaciares y Lagunas-ANA, 120.
- Alfaro, R., & Pacheco, R. (2000). Aplicación de algunos métodos de relleno a series anuales de lluvia de diferentes regiones de Costa Rica. *Revista Tópicos Meteorológicos*, 7(1), 41–51. Retrieved from <https://www.yumpu.com/es/document/read/13138363/aplicacion-de-algunos-metodos-de-relleno-a-series-anuales-de-lluvia>
- ANA. (2014). Inventario de Glaciares del Perú. In Autoridad Nacional del Agua. <https://doi.org/http://www.ana.gob.pe/media/981508/glaciares.pdf>
- Baraer, M., Mckenzie, J. M., Mark, B. G., Bury, J., Knox, S., Sciences, P., ... Cruz, S. (2009). Advances in Geosciences Characterizing contributions of glacier melt and groundwater during the dry season in a poorly gauged catchment of the Cordillera Blanca ( Peru ). *Advances in Geosciences*, 41–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/adgeo-22-41-2009>, 2009
- Baraer, Michel, Mark, B. G., Mckenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K., ... Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Baraer, Michel, Mckenzie, J., Mark, B. G., Gordon, R., Bury, J., Condom, T., ... Fortner, S. K. (2015). Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: A multi-site study in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 29(11), 2561–2581. <https://doi.org/10.1002/hyp.10386>
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). Climate Change and Water. In *Climate change and water* (p. 210). <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2010.08.039>
- Bodian, A., Dezetter, A., Deme, A., Djaman, K., & Dioo, A. (2018). Future Climate Change Impacts on Streamflows of and Gambia. *Hydrology*, 18. <https://doi.org/10.3390/hydrology5010021>
- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Remote Sensing of Environment Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca , Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.026>
- Bury, J., Mark, B. G., Carey, M., Young, K. R., Mckenzie, J. M., Baraer, M., ... Polk, M. H. (2013). New Geographies of Water and Climate Change in Peru : Coupled Natural and Social Transformations in the Santa River Watershed. *McGill University*, 103(October 2011), 363–374.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3–4), 733–767. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8>
- Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W., & Condom, T. (2011). Climate change threats to environment in the tropical Andes : glaciers and water resources. 11, 179–187. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0177-6>

- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, C., Suarez, W., Ramos, C., ... Gomez, J. (2012). Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, (August), 37–41.
- Croft, P. J., & Shulman, M. D. (2014). A Mesoclimatology of the Median Rain-Snow Line in New Jersey. *National Weather Digest*, (May).
- Dozier, J. (1989). Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*. 28:9-22., 22(February), 9–22. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3–4), 265–284. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4)
- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., & Yates, D. (2013). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia. *Aqua-LAC*, 5, 2–4.
- Falvey, M. (2018). Simulaciones climáticas regionales. Center for Climate and Resilience Research, 2(Fondap 15110009). Retrieved from <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/06/Simulaciones-climáticas-regionales-2018.pdf>
- Fang, G. H., Yang, J., Chen, Y. N., & Zammit, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2547–2559., 2547–2559. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>
- Francou, B. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research*, 108(D5), 4154. <https://doi.org/10.1029/2002JD002959>
- Francou, B., & Pouyand, B. (2004). Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. *Glacioclim*, 243.
- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J. E., Silvestre, E. E., Ginot, P., ... Mendoza, J. (2013). Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático. *Comunidad Andina*, 98.
- Francou, B., Ramirez, E., Cáceres, B., & Mendoza, J. (2000). Glacier Evolution in the Tropical Andes during the Last Decades of the 20 th Century: *Ambio*, 29(7):416-422., 29(7), 416–422. Retrieved from [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_7/b\\_fdi\\_57-58/010025562.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_57-58/010025562.pdf)
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., ... Stoffel, M. (2014). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan&ndash;Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313–2333. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>
- García, J., Jordan, F., Dubois, J., & Boillat, J. (2007). Routing System II des systèmes hydrauliques Modelización de flujos en sistemas. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Switzerland.*, 70. Retrieved from <http://docplayer.fr/5908760-Routing-system-ii-modelisation-d-ecoulements-dans-des-systemes-hydrauliques.html>
- García, J., Paredes, J., Foehn, A., Roquier, B., & Fluixa, J. (2019). RS MINERVE - Technical manual V2.21. *Group, Switzerland.*, (September).
- Haeberli, W., & Hoelzle, M. (1995). Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: A pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 206–212. <https://doi.org/10.1017/S0260305500015834>
- Hall, D. k., & Riggs, G. A. (2011). Normalized-Difference Snow Index (NDSI). En *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*, 779–80. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2>

- Hamlet, A. F., Elsner, M. M., Mauger, G. S., Lee, S., Norheim, R. A., Hamlet, A. F., ... Tohver, I. (2013). An Overview of the Columbia Basin Climate Change Scenarios Project : Approach , Methods , and Summary of Key Results. *Atmosphere-Ocean*, (October 2014), 37–41. <https://doi.org/10.1080/07055900.2013.819555>
- Hidrandina, S. A. (1989). *Inventario de glaciares del Perú*. Lima-Perú. Concytec, 173p.
- INEI. (2007). *Censos Nacionales, XI de Población y VI de Vivienda Perfil Sociodemográfico del Perú Lima*.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climates*. Cambridge Univ. Press, New York:, 966. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes*. Editado Por Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, y Alexander Nauels. OMM PNUMA., 34. Retrieved from [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf).
- Kaser, G., Juen, I., Georges, C., Gómez, J., & Tamayo, W. (2003). The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Bianca, Perú. *Journal of Hydrology*, 282(1–4), 130–144. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00259-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00259-2)
- Kattelmann, R. (1997). Flooding from rain-on-snow events in the Sierra Nevada. *Destructive Water*, (239), 59–65.
- Khadka, M., Kayastha, R. B., & Kayastha, R. (2020). Future projection of cryospheric and hydrologic regimes in Koshi River basin , Central Himalaya , using coupled glacier dynamics and glacio-hydrological models. *Journal of Glaciology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/jog.2020.51>
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haeberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/2011JF002313>
- López-Moreno, J. I., Valero-garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-molina, C., & Bazo, J. (2017). Science of the Total Environment Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment , Cordillera Blanca ( Peru ). *Science of the Total Environment*, The, 579, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.107>
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A., Chandler, R., Kendon, E., Widmann, M., ... Chun, K. P. (2010). Precipitation downscaling under climate change : recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. (2009), 1–34. <https://doi.org/10.1029/2009RG000314.1>.
- Marek, G. W., Gowda, P. H., Evett, S. R., Baumhardt, R. L., Brauer, D. K., Howell, T. A., ... Point, I. (2016). CALIBRATION AND VALIDATION OF THE. *Evapotranspiration: Monitoring & Modeling in Multiple Land Uses*, 59(2), 611–622. <https://doi.org/10.13031/trans.59.10926>
- Mark, B. G., Mckenzie, J. M., Gómez, J., Mark, B. G., Mckenzie, J. M., & Gómez, J. (2009). Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge : Callejon de Huaylas , Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 6667(2017), 975–987. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.975>
- Mark, B., & Seltzer, G. (2003). Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the cordillera Blanca, Perú. *Journal of Glaciology*, 165(271–281). Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3366>
- Maussion, F., Gurgiser, W., Großhauser, M., Kaser, G., & Marzeion, B. (2015). ENSO influence on surface energy and mass balance at Shallap Glacier, Cordillera Blanca, Peru. *Cryosphere*, 9(4), 1663–1683. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1663-2015>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Vuuren, D. P. Van, ... Wilbanks, T. J. (2010). change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

- Muñoz, R. (2017). Impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la subcuenca Quillcayhuanca, Perú. Master En Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/80276>
- Oudin, L. (2005). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. These, Ecole Nationale Du Genie Rural, Des Eaux et Des Forets, Paris. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00000931/>
- PRAA. (2013). Sistematización de componente 2: Adaptación al Cambio Climático en los Andes Tropicales. Intercooperation América Latina, 153.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Ramírez, E. (2008). Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. *Revista Virtual REDESMA*, 2(3), 49–61. Retrieved from <https://cebem.org/revistaredesma/vol5/articulo6.php?id=c1>
- Ramírez, E., Francou, B., Ribstein, P., Descloitres, M., Guérin, R., Mendoza, J., ... Jordan, E. (2001). Small glaciers disappearing in the Tropical Andes. A case study in Bolivia; the Chacaltaya Glacier (16° S). *Journal of Glaciology*, 47, 187–194. <https://doi.org/10.3189/172756501781832214>
- Rohrer, M., Salzmann, N., Stoffel, M., & Kulkarni, A. V. (2013). Science of the Total Environment Missing ( in-situ ) snow cover data hampers climate change and runoff studies in the Greater Himalayas. *Science of the Total Environment*, The, 468–469, S60–S70. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.056>
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, a. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1), 73–117. <https://doi.org/10.5194/hessd-2-73-2005>
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., ... Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>
- Schauwecker, Simone, Rohrer, M., Gmbh, M., & Huggel, C. (2016). Himalayas , with TRMM PR Bright Band information. *Meteorologische Zeitschrift*, (July). <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0738>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 2537–2556. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Setegn, S. G., Rayner, D., Melesse, A. M., & Dargahi, B. (2011). Impact of climate change on the hydroclimatology of Lake Tana Basin , Ethiopia. *Water Resources Research*, 47, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2010WR009248>
- Taylor, K. ., Stouffer, R. ., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Metreolog. Soc.*, 3(april), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Teutschbein, C., Wetterhall, F., & Seibert, J. (2011). Evaluation of different downscaling techniques for hydrological climate-change impact studies at the catchment scale. *Clim Dyn*, 2087–2105. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0979-8>
- UGRH-ANA. (2010). Inventario de glaciares de la cordillera Blanca. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, 123p.
- UGRH-ANA. (2015). Inventario de glaciares de la cordillera Blanca. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, 137p.
- UGRH. (1993). Estudio geológico en la sub-cuenca del río Yanayacu. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, 88p.

- USAID. (2014). A Review Of Downscaling Methods For Climate Change Projections. African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC).
- Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F., & Huang, Y. (2011). Climate change and mountain water resources : overview and recommendations for research , management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 471–504. <https://doi.org/10.5194/hess-15-471-2011>
- Vuille, M. (2013). El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes Tropicales. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 29.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Earth-Science Reviews Climate change and tropical Andean glaciers : Past , present and future. *Earth-Science Reviews*, 89, 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- Zink, M., Moreira, A., Bachmann, M., Bräutigam, B., Fritz, T., Hajnsek, I., ... Wessel, B. (2011). TanDEM-X Mission Status, in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 317–320. <https://doi.org/DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049666>

*Como citar este artículo:*

Tacsi, A., *et al.*, (2021). Modelización hidro-glaciológico actual y futura de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 108-127. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-08



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

## Paquete tecnológico UchileCrea para el control inteligente del riego en sistemas frutícolas

*UchileCrea technological package for the intelligent control of irrigation in fruit systems*

Aqua-LAC

Miembro del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

Rodrigo Callejas-Rodríguez<sup>1\*</sup>, Oscar Seguel<sup>1</sup>

Recibido: 9/08/2021

Aceptado: 10/10/2021

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El manejo del riego en la fruticultura es una de las principales labores agrícolas que deben ejecutar los productores en sus predios. A pesar de existir, teóricamente, un sinnúmero de alternativas para su control, ellas no son necesariamente eficientes en determinar en forma clara el tiempo y la frecuencia de riego durante la temporada de producción. Por esta razón, el equipo UchileCrea de la Universidad de Chile ha trabajado por más 20 años para definir y validar un paquete tecnológico (PT) para el control del riego, enmarcado en la integración de nuevas tecnologías (sondas de capacitancia, IoT, manejo de precisión, NDVI, etc.) y que en la actualidad se hace más necesario, por el recurrente incremento de la escasez hídrica que vive el país producto del cambio climático, lo que obliga a aumentar la eficiencia de uso del agua de riego (EUAr). De acuerdo a la metodología internacional establecida para la generación de paquetes tecnológicos, se definieron 4 etapas que se debían cumplir. Etapa 1: selección de tecnologías y conformación de sub-paquetes. Etapa 2: propuesta de paquete tecnológico. Etapa 3: validación y retroalimentación. Etapa 4: promoción y adopción del PT. Se pudo verificar que es posible definir el tiempo y frecuencia de riego en forma óptima, mejorando los rendimientos, ahorrando entre 20 a 40% del recurso hídrico utilizado, aumentando la EUAr y disminuyendo el consumo de energía eléctrica. Adicionalmente, este PT permite tener una nueva herramienta probada para enfrentar la escasez hídrica que vive el país y, a través de la promoción permanente, seguir incorporándolo en el sistema frutícola nacional.

**Palabras clave:** Escasez hídrica, sonda de capacitancia, NDVI, Bomba de Scholander, eficiencia de uso del agua de riego (EUAr).

### Abstract

*Irrigation management in fruit growing is one of the main agricultural tasks that producers must carry out on their farms. Despite the theoretical existence of a number of alternatives for irrigation control, they are not necessarily efficient in clearly determining the time and frequency of irrigation during the season. For this reason, the UchileCrea team from the University of Chile has worked for more than 20 years to define and validate a technological package (PT) for irrigation control, framed in the integration of new technologies (capacitance probes, IoT, management of precision, NDVI, etc.) and a recurrent increase in the country's water shortage, as a result of climate change, forcing to increase the water use efficiency of irrigation (EUAr). According to the international methodology established for the generation of technological packages, 4 stages were defined that had to be fulfilled: Stage 1, selection of technologies and creation of sub-packages. Stage 2, proposal for a technological package. Stage 3, validation and feedback. Stage 4, promotion and adoption of the PT. It was possible to verify that it is possible to define the time and frequency of irrigation in an optimal way, ensuring maintenance or improving yields, saving between 20 to 40% of the water used, increasing the EUAr and decreasing the electrical energy consumption. Additionally, this PT allows to have a proven program to face the water scarcity that the country is experiencing and through permanent promotion, it has been incorporated into the national fruit system.*

**Keywords:** Water scarcity, capacitance probes, NDVI, Scholander pump, water use efficiency of irrigation (EUAr).

1 Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Centro Regional de Estudios Agronómicos, UchileCrea. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile. rcalleja@uchile.cl



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Chile es uno de los países privilegiados en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos superficiales a nivel mundial (Fundación Chile, 2018), valorizándose la Cordillera de Los Andes a lo largo de todo el territorio, la cual juega un rol central en la disponibilidad del recurso hídrico del país, dado que en sus altas cumbres se acumula la nieve invernal que queda disponible para los meses secos, principalmente entre primavera y verano (Belmar *et al.*, 2020). A nivel nacional, el consumo se reparte entre el rubro pecuario (0.7%), minería (3.9%), eléctrico (4.5%), industrial (6.7%), agua potable (11.8%) y la agricultura (72.3%) (DGA, 2017a). Si a esto se suma, según la clasificación de Köppen (Santibáñez y Uribe, 1993), un clima mediterráneo templado con veranos secos, se explica el gran desarrollo de la fruticultura chilena, llegando a tener en la actualidad 350 mil ha en producción, las cuales generan cinco millones de toneladas de fruta al año, llegando con exportaciones a más de 140 países en el mundo (ODEPA, 2020) y alcanzando un PIB agrícola ampliado equivalente al 14.36% (ODEPA, 2019).

Sin embargo, desde la década del 2000 se comenzó a constatar claramente en el centro-norte de Chile un cambio en el régimen de las precipitaciones que se fue acentuando con el pasar de los años, dando origen al trabajo realizado por el Centro Regional de Estudios Agronómicos de la Universidad de Chile (UchileCrea) en la zona desértica de la Región de Atacama (FIA-Universidad de Chile, 2003; FDI-CORFO-Universidad de Chile, 2004).

De situaciones puntuales de sequía en algunos territorios, rápidamente se pasó a una escasez hídrica más amplia (CR2, 2015 y 2020; Santibáñez, 2017), constatándose que, desde el año 2010 en adelante, gran parte del país experimentó un déficit de precipitaciones cercano al 30% en forma ininterrumpida, siendo la década más cálida de los últimos 100 años y denominándose esta situación como una “megasequía” que se intensificará en los próximos 30 años (DGA; 2017b, 2020; Araya-Osses *et al.*, 2020).

El mundo agrícola, en conjunto con el Estado, determinan que se requiere implementar cambios tecnológicos a la brevedad a nivel extra e intrapredial (FIA, 2015), siendo fundamental el fortalecimiento del trabajo público-privada (Fernández *et al.* 2020).

Se define que es de vital importancia evitar las pérdidas por conducción del agua de riego, que pueden llegar al 40% (Sandoval, 2003; CNR, 2009) y aumentar la eficiencia del uso del recurso hídrico, asociada a sistemas de riego tecnificado o paquetes tecnológicos (PT) que promuevan un manejo eficiente del riego, dado que se ratificaban pérdidas de agua a nivel intrapredial de hasta un 45% (Callejas *et al.*, 2014 a y b; Ferreyra y Sellés, 2014).

Los PT se definen como un conjunto de conocimientos de prácticas agrícolas provenientes de la investigación pero validado en terreno (Bazán, 1977; Torres *et al.*, 2014). Como método de adopción de tecnologías se generaron durante la “Revolución Verde” en los años 70’, advirtiendo Briones (2015) que, para no cometer los mismos errores de esa época, requieren ser generados y probados con los productores, evitando que sean impuestos desde arriba o de otras realidades productivas diferentes a los sitios donde se requiere impactar. Rose *et al.*, (2016) plantean que en la agricultura hay que tener conciencia que, a pesar de una amplia oferta y formato de tecnologías para optimizar la toma de decisiones, la aceptación a nivel mundial es decepcionantemente baja, ocurriendo lo mismo en Chile (Banco Mundial, 2009).

Si bien existen en la actualidad innumerables avances y/o herramientas tecnológicas en la agricultura (FIA, 2008; Carpio Santos, 2018), esto no es equivalente a señalar que los agricultores gozan de nuevos PT, en otras palabras, la existencia de múltiples tecnologías por separado sin una integración lógica y eficaz, no puede ser denominado PT. Una vez integradas las tecnologías, esta nueva propuesta debe estar probada en terreno y validada a través del incremento de la productividad y la seguridad alimentaria (Silva, 2011, Naranjo 2004).

Bazán (1977) es claro en señalar que un nuevo PT debe poseer las siguientes características: A) debe ser de tipo integral y no una suma de partes individuales, B) creado y validado a nivel predial, C) no desechar lo que el agricultor tiene y sabe y D) introducir paulatinamente el PT, mostrando mejoras de acciones positivas. Normalmente estos PT deben desagregarse en “Sub-paquetes” para facilitar su adopción, especialmente entre pequeños productores (Bazán, 1977; Silva, 2011). Finalmente, hay que hacer un gran esfuerzo en la promoción del PT y evaluar reiteradamente su adopción y resultados efectivos (de Janvry *et al.*, 2011).

## 1.2 Objetivo

El objetivo fue desarrollar, validar y promover un paquete tecnológico (PT) que permitiera una eficiente determinación del tiempo y la frecuencia del riego en sistemas frutícolas, logrando importantes ahorros en el uso del recurso hídrico, pero sin afectar negativamente los rendimientos y la calidad de la fruta.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Se ejecutó, ordenadas de norte a sur (regiones desérticas a mediterráneas), en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Región Metropolitana y de O'Higgins. Atacama (25°18' y 29° 43' latitud sur y entre los 68° 19' y 71° 30' de longitud oeste) posee un clima desértico, con menos de 30 mm de precipitación anual (según clasificación de Köppen; Santibáñez y Uribe, 1993; UNESCO, 2010). En el sur, la Región de O'Higgins (33°51' y 35°01' de latitud sur y desde 70°02' de longitud oeste) presenta un clima templado-cálido (según la clasificación de Köppen, Santibáñez y Uribe, 1993) con lluvias invernales que alcanzan los 550 mm al año y estación seca prolongada (7 a 8 meses). Los suelos ocupan posiciones de terrazas aluviales y coluvios con pendientes menores al 20%, de profundidad y pedregosidad variable, principalmente con texturas medias y finas, incrementándose las texturas gruesas cercano a los ríos (Casanova *et al.*, 2013).

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Marco conceptual

El desarrollo del PT se enmarcó en dos importantes conceptos: "innovación tecnológica" y "manejo de precisión". Respecto a lo primero, FIA (2019) señala que se deben abordar problemas relevantes para las personas o empresas del sector agrario, desarrollando nuevos o mejorados productos, servicios y/o procesos, mediante soluciones que aporten valor y que queden a disposición de los agricultores. Respecto del manejo de precisión en la agricultura, Villalobos *et al.*, (2009) lo define como un conjunto de herramientas tecnológicas que permiten identificar, analizar y modelar la variabilidad espacial y temporal de los cuarteles agrícolas, con la finalidad de poder manejarla de acuerdo a los objetivos productivos de cada agricultor. En este caso en particular, el PT ha sido el resultado de un importante

número de proyectos de investigación y desarrollo, así como de los aportes de alumnos de pre y postgrado de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, a través de sus memorias de título y maestrías.

### 3.2. Generación del paquete tecnológico

La metodología para la generación del PT se adaptó a partir de los pasos señalados por Torres *et al.*, (2014) y consideraciones señaladas por Bazán (1977) y de Janvry *et al.*, (2011), definiendo cuatro etapas:

Etapa 1. Selección de tecnologías y conformación de sub-paquetes. A partir del año 2003, se procedió a definir las tecnologías que permitieran la clara definición del tiempo y la frecuencia de riego, que soportaran las condiciones de campo y su utilización en las evaluaciones de terreno.

Etapa 2. Propuesta de paquete tecnológico, estrategias y explicación del rol o función de cada sub-paquete. En función de la complementación de las diferentes tecnologías y manejos, se seleccionaron aquellas que presentaban mayor utilidad en el manejo del riego y un manejo sustentable del suelo.

Etapa 3. Validación y retroalimentación. El paquete tecnológico fue aplicado en varias zonas y especies frutícolas, considerando para su validación: a) que permitiera lograr igual o mayores rendimientos, b) en lo posible mejor calidad de la fruta, c) ahorro de agua de riego, d) ahorro de energía eléctrica en sistemas tecnificados y e) rescate de cualquier otra externalidad positiva, como la mejora de las características del suelo y el sistema radical.

Etapa 4. Promoción y adopción del PT. Se identifican las razones que dificultan la adquisición del PT o sub-paquetes, determinando los retos del futuro.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Etapa 1. Selección de tecnologías y conformación de sub-paquetes

#### 4.1.1 Sondas de capacitancia FDR y plataformas de gestión

Gracias al trabajo en conjunto con el Dr. Juan Vera, SEBAS-CSIC Murcia, España (Vera, 2004; Callejas *et al.*, 2014b, Fernández *et al.*, 2020), se definió optar por la sonda de capacitancia FDR Enviroscan y/o Drill & Drop (Sentek). Como plataformas de gestión se eligieron: a) IrriMAX Software (Sentek) para PC, dado el gran potencial de administración de datos y generación de información a partir de ellos, b)

IrriMAXLive (Sentek), para un trabajo más simple en la nube y c) DropControl (Wiseconn), plataforma web de fácil manejo en la que se pueden ejecutar otras tareas, tales como riegos y fertirrigación, siendo esencial para ejecutar ensayos en terreno.

Instalación de los equipos en terreno. Se realizaron de acuerdo a los protocolos y criterios de Sentek (2021), evitando la generación de flujos preferenciales de agua. Ya instaladas las sondas de capacitancia, hubo un periodo de “estabilización de la variabilidad de las lecturas”, donde se evalúa el comportamiento de los sensores y el sistema de transferencia de datos, corroborando su óptimo funcionamiento, continuidad en las lecturas y la ausencia de anomalías.

Definición de la frecuencia de riego. Se debe generar el gráfico conocido como “gráfico sumatoria” (Figura 1, inferior), donde se integran los datos provenientes de todos los sensores, con la excepción del más profundo, el que no debiera mostrar actividad o

dinámica (agotamiento evidente entre riegos por consumo de las raíces). En algunas ocasiones, cuando los suelos no son profundos y se observa una importante actividad en el último sensor, este debe ser considerado en el gráfico sumatoria.

Definición del tiempo de riego. En el gráfico “apilado” (Figura 1, superior) se muestran los registros de todos los sensores por separado. Con esta información se puede definir en qué profundidad se encuentra la mayor cantidad de raíces absorbentes (20 cm), esto quiere decir, mayor actividad del sistema radical (mayor agotamiento diario del agua). La profundidad del último sensor debe ser aquella donde no se observan raíces de manera evidente, permitiendo definir el tiempo de riego cuando el frente de agua llega a esa profundidad (sensor 4, 80 cm de profundidad), lo que se manifiesta en un ligero incremento del contenido de agua.

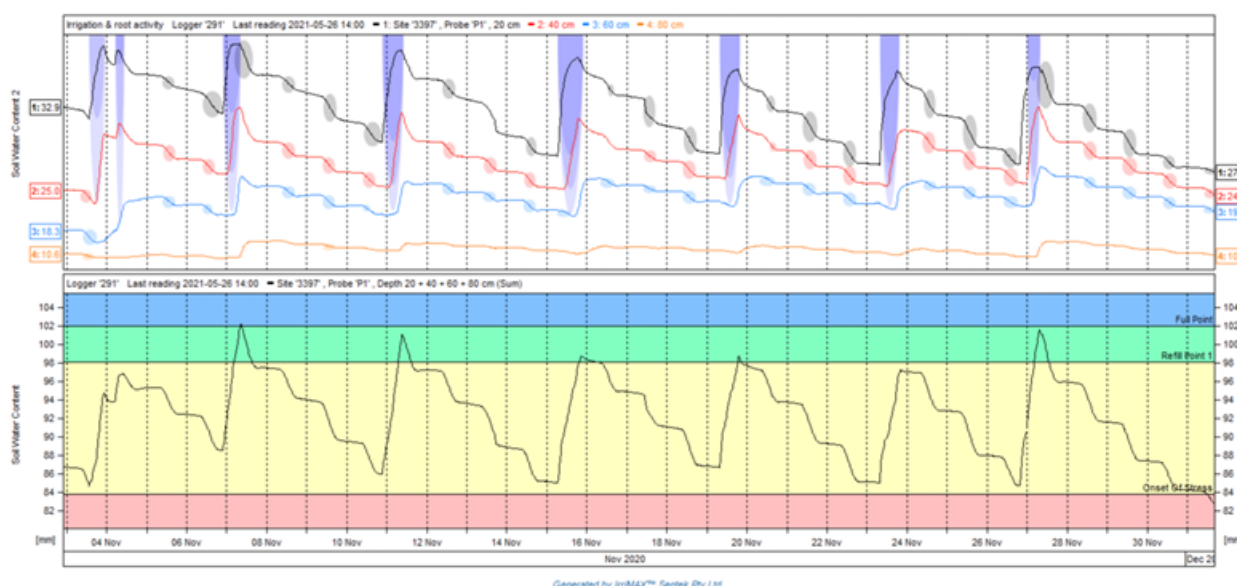


Figura 1. Gráfico apilado (superior), donde se observan las mediciones de los cuatro sensores instalados a sus respectivas profundidades; los primeros tres sensores muestran gran actividad (agotamiento del agua) y el cuarto no. Gráfico sumatoria (inferior) generado con los sensores ubicados a 20, 40 y 60 cm de profundidad, mostrando la dinámica del contenido de agua en el suelo; cada peak corresponde a un evento de riego y la serie de escalones en la curva, representa el agotamiento diario de agua en el suelo que realiza la planta.

Líneas de Gestión (LG). Es fundamental en el gráfico sumatoria generar puntos de referencia, denominados “Líneas de Gestión” del riego, que facilita la ejecución del riego en la práctica para la correcta toma de decisiones (Callejas *et al.*, 2014b).

a) Nivel de Lleno (NLL) o *full point*. Es la máxima cantidad de agua que puede contener el suelo sin que se produzca percolación profunda, condición que debe ser determinada analizando el gráfico apilado según el registro del sensor más profundo, lo que define el tiempo de riego. Se debe hacer una excepción si el objetivo es hacer un riego de lavado

de sales, en cuyo caso el tiempo de riego se extiende y el sensor de mayor profundidad presenta un incremento evidente en el contenido de agua.

b) Capacidad de Campo sonda (CCS) o *refill point* 1. Se usa la denominación CCs ya que se refiere al mismo concepto de capacidad de campo definido por Veihmeyer y Hendrickson (1950), pero determinado con la sonda, lo que integra posibles discontinuidades entre horizontes. Por lo tanto, se puede fijar la CCs en invierno, sin transpiración y mínima evaporación desde la superficie, después de una lluvia abundante, un riego profuso o con la ayuda de un cilindro infiltrómetro, sobre todo en áreas con bajas o sin precipitaciones. En el gráfico apilado de la Figura 1, se observa en la base de la franja verde el momento en que se estabiliza la pérdida de agua una vez que se cortó el riego.

c) Punto de Recarga (PR) u *onset of stress*. Conocido como umbral de riego, lo que define la frecuencia del riego. Es el punto donde la caída diaria del contenido de agua, evaluada por los sensores superiores a una máxima demanda atmosférica y constante (ETo), comienza a disminuir producto de la reducción del contenido de agua en el suelo (aumento de la tensión de retención), dificultando la absorción del agua por parte de la planta. Algunas plataformas nombran a esta LG como “inicio de estrés”, pero hemos descartado esta denominación dado que no necesariamente es factible constatar, a través de otras variables fisiológicas, que la planta está sufriendo estrés (Ej: potencial hídrico xilemático, conductancia estomática, etc.). Adicionalmente, promueve alarma entre los agricultores, procediendo a regar anticipadamente.

d) Relleno en Zona de Inicio Estrés (RZIE). Umbral claramente por debajo del PR, utilizado en casos especiales donde se requiere lograr un objetivo comercial o condición especial sobre la planta, que deben ser validados en la práctica con investigación aplicada. Algunos ejemplos son: mejor calidad de la materia prima para la producción de vinos, mayor color en variedades de uva de mesa, promoción de crecimiento de raíces, maduración de madera en zonas donde las condiciones templadas se prolongan en otoño, etc.

e) Relleno Temprano (RT). Esta LG se utiliza para adelantar el riego respecto del PR, tales como: 1) En algunos estados fenológicos donde la presencia de un estrés mínimo podría afectar, hipotéticamente, los rendimientos o calidad de la fruta, como por ejemplo el crecimiento de baya en uva de mesa. 2) Mantener

un mayor estatus hídrico en la planta durante un período. 3) Las raíces estén centrada en una zona bien delimitada del perfil de suelo y, por ende, se produce un mayor consumo de agua o desecamiento más rápido de ese sector del suelo. En este caso se requiere estudiar los sensores específicos de esta zona y que no generen múltiples micro-estrés en el tiempo, afectando el óptimo desarrollo de las plantas. 4) Gran proliferación de raíces en superficie, por ejemplo por el uso de *mulch* naturales, compost o compost in situ (estiércol y materia seca), lo que obliga a una mayor atención del primer sensor, de manera de evitar deshidratación o muerte de las raíces que crecen en este sustrato. Así, la definición de las LG permitirá al agricultor no sólo determinar el tiempo y la frecuencia de riego a lo largo de la temporada, sino manejar estrategias específicas en función del patrón de enraizamiento del cultivo o los objetivos buscados. El complemento de esta tecnología con medidores de caudal, más el correcto registro de los rendimientos, permite calcular la eficiencia de uso del agua de riego y optimizar el consumo energético.

#### 4.1.2 Estaciones meteorológicas

En la determinación del riego usando sondas de capacitancia, es importante obtener datos de evapotranspiración potencial (ETo) del lugar, idealmente a nivel diario. Se pueden instalar estaciones meteorológicas en el predio u obtener la información desde la web, por ejemplo, [www.agroclima.cl](http://www.agroclima.cl).

#### 4.1.3 Bomba de Presión tipo Scholander

Se seleccionó la cámara *Scholander modelo Pump-up* (PMS Instrument Company, Oregon, USA), diseñada por el Dr. Ken Shackel, que sirve para evaluar el potencial hídrico xilemático a medio día ( $\Psi_{xm}$ ) en la gran mayoría de los frutales bajo riego (Naor *et al.*, 1998; Choné *et al.*, 2001; Williams y Trout, 2005; Rosati *et al.*, 2006; Shackel, 2011). Presenta la ventaja de no requerir un tanque de gas comprimido ya que la generación de presión depende del bombeo manual de un pistón, lo que facilita su uso en terreno. Sin embargo, las evaluaciones se dificultan en algunos frutales como los olivos bajo tratamientos de riego deficitario controlado (RDC), dado que el equipo alcanza una presión máxima de -2 MPa. En zonas con permanentes cielos nublados, es recomendable desarrollar las líneas de referencia respecto del déficit de presión de vapor (DPV) (Shackel *et al.*, 1997; Olivo *et al.*, 2009; Gálvez *et al.*, 2014).

#### 4.1.4 Sensor TDR para evaluaciones en calicatas o desde la superficie del suelo

Para evaluaciones discontinuas del contenido de agua en el suelo se eligió el sensor TDR100, que evolucionó al TDR150 (Spectrum Technologies Inc., Illinois, USA), el cual además entrega valores de temperatura y conductividad eléctrica, esta última muy importante en condiciones climáticas áridas o con agua de riego de mala calidad. En comparación con otros equipos similares, en este sensor tanto su cuerpo como las sondas de penetración (varillas) son robustas para el trabajo de campo, lo que asegura su gran durabilidad.

Si bien este tipo de sensor es más económico que uno de monitoreo continuo, requiere de la confección de calicatas y entrega sólo información parcial al momento de medir, no dando una visión completa de la dinámica temporal del agua del suelo. Se deben realizar calicatas frente a los árboles (a 40 cm del tronco), generalmente en sentido perpendicular al sentido del riego, de 2 m de ancho y 1.5 m de profundidad; en este caso se puede evaluar con varillas de 7.5 cm de largo, realizando evaluaciones a diferentes profundidades o en un reticulado, como se verá más adelante, y los datos pueden ser gestionados en Excel (*Microsoft*) o SigmaPlot (*Systat Software Inc.*) para facilitar el manejo de la información, por ejemplo, calcular promedios por profundidad o realizar gráficos 2D de distribución del agua en torno a la zona de riego. Otra posibilidad de evaluación es obtener información desde la superficie, usando las varillas de 20 cm de largo.

#### 4.1.5 Uso de imágenes satelitales

Se utiliza principalmente el índice espectral de vigor fotosintético de la vegetación NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), obtenido de imágenes satelitales (10m x 10m) del sensor MSI de Sentinel 2, agrupando las zonas a través del estadístico de agrupación espacio-temporal multivariante K-MEANS, ampliamente utilizado para la realización de análisis de clúster o análisis de conglomerados (Kassambara, 2015) y en la clasificación no supervisada de imágenes satelitales (Borra *et al.*, 2019).

Las imágenes son de naturaleza gratuita y abarcan todo el territorio a nivel nacional, con una frecuencia temporal y una escala espacial que permite conocer la dinámica de un huerto durante la temporada y a lo largo de los años, ya que se dispone además de imágenes históricas. Si bien existen otros índices de

estrés, el NDVI está ampliamente validado, siendo aplicable a cualquier especie vegetal de una manera fácil de interpretar.

#### 4.2 Etapa 2. Propuesta de paquete tecnológico, estrategias y explicación del rol o función de cada sub-paquete

##### 4.2.1. Criterios para la instalación de las sondas

La gran mayoría de la experiencia del PT se basa en el trabajo con frutales bajo riego por goteo. La unidad básica es el “Sector de Riego”, definido según la homogeneidad del suelo, el que puede ir de 0.5 ha, en pequeños agricultores, hasta 10 y más hectáreas en productores grandes. A continuación se mencionan los pasos:

Paso 1. Determinación de un sector representativo, donde se elegirá la planta indicadora para instalar la sonda. Para esto utilizamos las imágenes satelitales con el objetivo de definir la variabilidad temporal (temporadas anteriores) y espacial del vigor de los huertos (Figura 2). Lo esperable, si la plantación se hizo correctamente, es que la mayor superficie del huerto presente condición vegetativa similar y con altos valores.

En un huerto productivo referencial (Figura 2, derecha), se ve que el 2° y 3° cuartil están muy cerca uno del otro, situación ideal, ya que esto indica que el 50% de la superficie se encuentra entre dichos valores y que la diferencia entre el valor mínimo y máximo (IQR) es ínfima. Por lo tanto, este comportamiento es el óptimo, al observarse valores altos de NDVI y un IQR pequeño durante el periodo crítico. Siempre será importante realizar calicatas (3) en el sector elegido, para verificar la presencia y densidad de raíces que tienen las plantas dentro del bulbo húmedo.

En la Figura 2, es factible instalar el sensor en cualquiera de los sectores con el tono verde más representativo del huerto (no el verde más intenso). En caso de tener una unidad de riego no homogénea (con grandes diferencias de vigor), se deberá buscar un sector homogéneo y representativo, teniendo presente la necesidad de hacer manejos específicos en los sectores de bajo vigor.

Paso 2. Caracterización del bulbo de mojamiento y observación de la presencia de raíces. Luego de un riego, se aconseja realizar unas tres calicatas en el sector elegido en el Paso 1. De esta manera se ratificarán los datos del “estudio de suelo” que se utilizó para diseñar el sistema de riego. Se

recomienda tomar una muestra de suelo del sector de mayor presencia de raíces (15 a 60 cm de suelo) y se mandará a laboratorio solicitando un análisis textural, pudiendo usar el *software Spaw* (USDA) para su interpretación (Callejas *et al.*, 2014b). En las mismas calicatas, se procederá a evaluar con el equipo TDR150 y cada 20 x 20 cm, el contenido volumétrico de agua en el suelo para determinar la conformación del bulbo húmedo; observando la abertura hacia la lateral o entre hilera (ancho) y si el tiempo de riego permite humedecer la profundidad de suelo deseada para la especie frutal (Figura 3, izquierda).

Adicionalmente, se podrán realizar evaluaciones con la varilla de 20 cm desde la superficie, para verificar que el bulbo es continuo en la sobre hilera de plantación. Se sugiere registrar, a través de una caracterización cualitativa, la abundancia de raíces en el bulbo húmedo y, en lo posible, dejar constancia con fotografías (Figura 3, derecha). En suelos salinos o salinos sódicos, se debe registrar adicionalmente la conductividad eléctrica (CE,  $\text{dS m}^{-1}$ ) con el mismo equipo (Figura 3, centro).

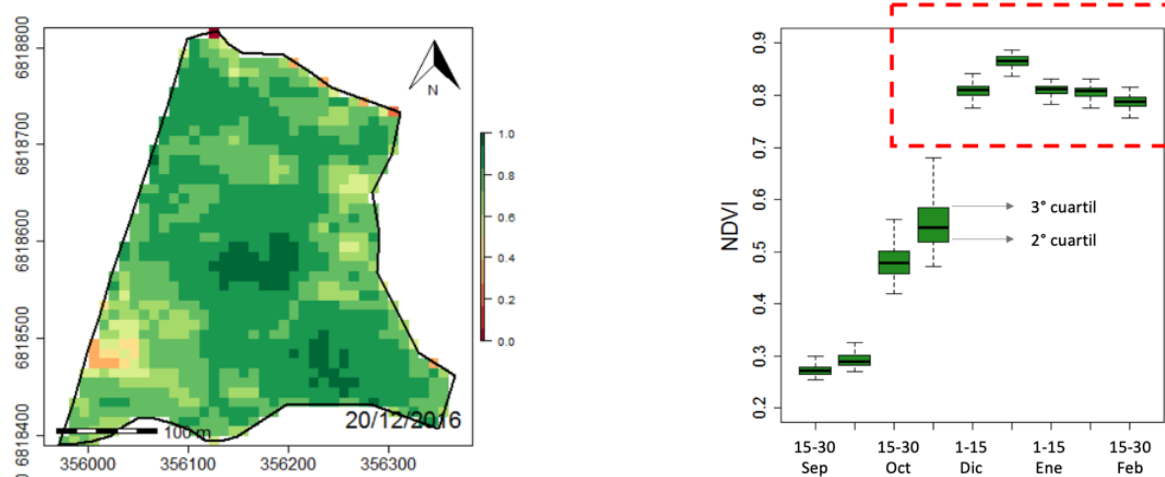


Figura 2. Determinación de sector donde se instalará la sonda, según la variabilidad espacial (izquierda, el sector de riego) y temporal (derecha, durante 5 meses) del vigor, determinado a través del NDVI. Los tonos verdes más oscuros reflejan el mayor vigor, en tanto colores anaranjados acusan el menor vigor.

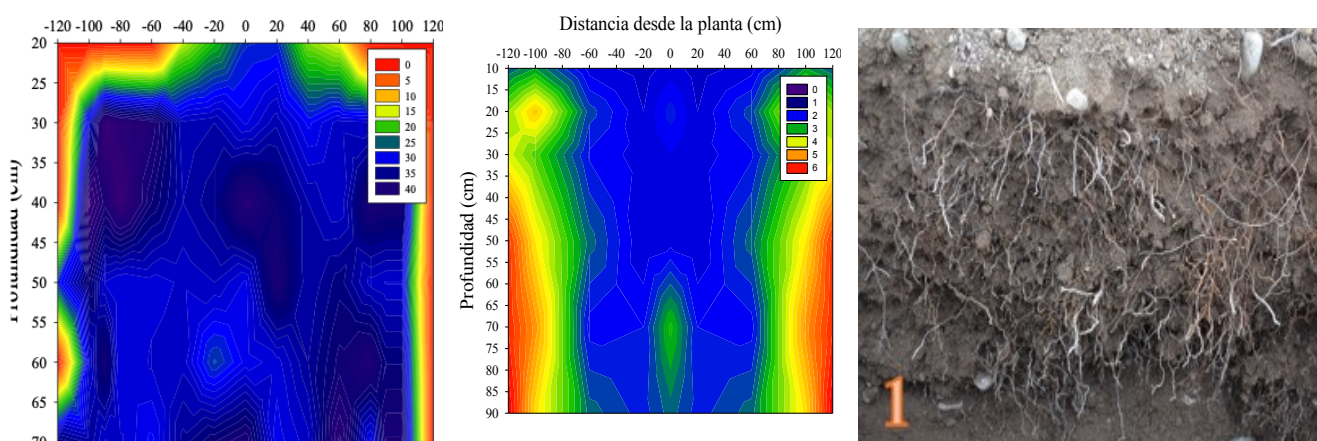


Figura 3. Izquierda, contenido de agua en el suelo (escala de 0 a 40 % de humedad) y determinación de la conformación del bulbo húmedo usando un equipo TDR150. Centro, contenido de sales del bulbo, con escala entre 0 y 6  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Derecha, determinación visual de la presencia de raíces en el bulbo húmedo.

Paso 3. Elección de planta indicadora y validación de un buen sistema radical. Del sector definido se elegirán 5 plantas sanas, bien desarrolladas, ojalá con fruta a la vista y que podrían convertirse en las plantas indicadoras donde se instale la sonda. Posteriormente se procede a evaluar con la Bomba de Scholander el comportamiento del  $\Psi_{xm}$  (Gálvez *et al.*, 2014; Navarrete, 2012) durante días continuos, para ratificar la adecuada presencia de raíces en el bulbo de mojamiento a partir de la reacción de las plantas a los ciclos de riego. Se busca que la velocidad de absorción de agua esté equilibrada con la velocidad de pérdida por transpiración de la parte aérea de las plantas, de manera de trabajar con un “Bulbo Húmedo Activo” (con raíces), dado que se ha observado en algunos casos que se puede estar en una situación de estrés aún inmediatamente después de un riego (Munizaga, 2019), dado que el sistema agua-suelo-raíces no es lo suficientemente eficiente para compensar la velocidad de pérdida diaria de agua a través de los estomas, normalmente por una baja densidad de raíces. Por lo tanto, se propone evaluar después de un riego, esperando registrar un alto  $\Psi_{xm}$  (ejemplo en vides de mesa: -0.35 MPa), procediendo a realizar un seguimiento de la caída diaria del potencial hídrico hasta el próximo riego, recomendándose usar en este caso un umbral de riego ideal para la especie (ejemplo en vides de mesa: entre -0.68 a -0.7 MPa; Ferreyra *et al.*, 2006; Gálvez *et al.*, 2014). Posterior al riego, se vuelve a verificar el  $\Psi_{xm}$ , de manera de ratificar la capacidad de rehidratación de las plantas. Valores normales de  $\Psi_{xm}$  y una evolución lógica entre riegos, podrán ratificar que las plantas elegidas (incluido el sistema radical) tiene una estrecha relación con el sistema de riego y la conformación del bulbo húmedo, pudiendo ser planta indicadora.

Paso 4. Ratificación de LG, tiempo y frecuencia. Instalada la sonda en la planta indicadora, pasada la etapa de estabilización de la variabilidad, definidas las LG y habiendo ratificado una buena actividad del sistema radical observada en la plataforma de gestión, se procede a validar la frecuencia y tiempo de riego. Para esto y utilizando la Bomba de Scholander, se procede a evaluar en diferentes ciclos de riego definidos por la sonda, los valores de  $\Psi_{xm}$  registrados en el PR. Para esto se eligen plantas al azar dentro del sector de riego, inclusive de diferentes niveles de expresión de vigor (NDVI), procediendo a ratificar que las plantas se encuentran en un rango óptimo de  $\Psi_{xm}$  o estatus hídrico. De esta forma se

soluciona el gran desafío que tenía la operación del riego y que es la gran falencia de los sistemas de control tradicionales: “¿cómo definir el umbral de riego, para cada suelo y especie frutal, de acuerdo al concepto de nivel de agotamiento permisible?” (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005). Es importante aclarar que el contenido de agua en el suelo “fácilmente disponible” es definido en este caso entre CCs y PR; con un umbral de riego sujeto a decisiones objetivas.

Paso 5. Mantener la mayor densidad de raíces activas y un adecuado balance de agua y oxígeno en el bulbo de mojamiento. El riego inteligente considera dos aspectos centrales: a) que se permita la conjunción en un bulbo húmedo no compactado (“suelo vivo”), de una alta densidad de raíces con una adecuada dotación de agua de riego y un óptimo programa de fertilización y b) el riego no es solamente adicionar agua al suelo, sino que es fundamental mantener un óptimo balance de agua y oxígeno. Por lo tanto, un buen riego no solamente se logra aplicando agua antes que se llegue al nivel de agotamiento admisible, sino asegurando tener un sistema radical denso, creciendo activamente, sano y que permita, tal como lo dice Gurovich (2001), que la velocidad de absorción de agua equilibre la velocidad de pérdida por transpiración de la parte aérea de las plantas.

Dado que los suelos de la zona frutícola en Chile se caracterizan por bajos niveles de materia orgánica (< 1.5%) y considerando el uso masivo de riego por goteo junto a la imposibilidad de usar estiércol en huertos destinados a exportación, es que se ha propuesto en el marco de este PT el uso permanente de sustancias orgánicas líquidas para promover una buena estructura de suelo y desarrollo de las raíces (Seguel *et al.*, 2020a). Las enmiendas orgánicas líquidas han demostrado incrementar la porosidad de aireación y la retención de agua aprovechable por la planta, además de disminuir la resistencia mecánica del suelo, por lo que son efectivas en mejorar las condiciones para una óptima exploración radical, incluso en condiciones de restricción hídrica, como estrategia de adaptación al cambio climático (Seguel *et al.*, 2020b).

Una de las ventajas que tiene el uso de sondas de capacitancia bajo estos manejos, es la posibilidad de evaluar año a año los cambios de la actividad (intensidad diaria de agotamiento de agua del suelo) o la presencia de raíces (profundidades en las cuales se verifican estos cambios), recomendándose

comparar, para un mismo mes de años diferentes y en días de alta demanda climática (alta ETo o DPV), la caída diaria del contenido de agua en el suelo. Si hay mejores raíces, se observará una mayor expresión de los escalones de caída, sobre todo en la zona de mayor presencia de raíces, normalmente entre los 15 y 50 cm de profundidad.

Paso 6. Extrapolación de tiempo y frecuencia de riego a sectores sin sondas de capacitancia (Kcs). La definición del riego con este PT y la información registrada, permite obtener el volumen de agua requerido por semana, meses o temporada, equivalente a la demanda bruta (Db) que multiplicado por la eficiencia del riego (Efa) permite determinar la evapotranspiración de cultivo (ETc). Ocupando la fórmula  $Kcs=(Db \times Efa)/ETo$ , podemos determinar un factor que hemos denominado “coeficiente de

cultivo sonda (Kcs)” que permite extrapolar los resultados de un sector de riego con sondas a otro que no tiene los equipos. Para esto, se requiere que este nuevo sector de riego sea vecino (igual condición climática), tenga un suelo similar, la misma especie y manejo, en plena producción y validando con las imágenes satelitales un comportamiento similar de la variabilidad espacial y temporal del índice de vigor (Gordillo *et al.*, 2014; Castañeda *et al.*, 2015; Pocas *et al.*, 2015; Balbontín *et al.*, 2017; Odi-Lara *et al.*, 2016). Cumpliendo con estas exigencias, se implementa el mismo programa de tiempo y frecuencia del sector con sondas y se verifica el comportamiento de las plantas frente a los ciclos de riego a través de la evaluación del  $\Psi_{xm}$  con la Bomba de Scholander. En la Figura 4 se presenta un resumen de los diferentes pasos del PT.

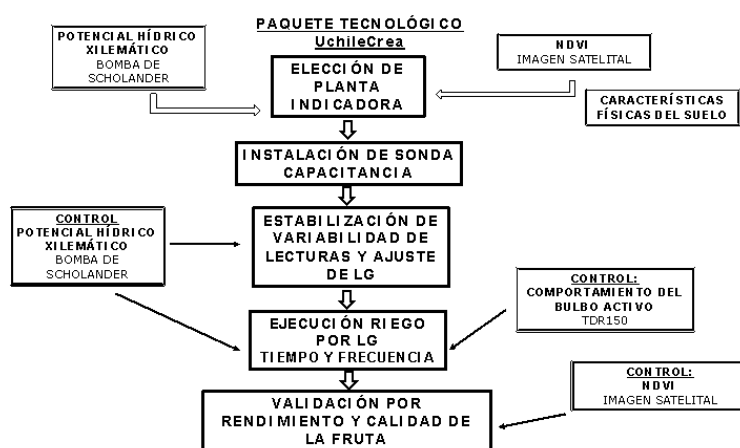


Figura 4. Resumen de los pasos que conforman el PT

### 4.3 Etapa 3. Validación y retroalimentación

#### 4.3.1 Regiones de Atacama y O'Higgins

La información fue publicada en Callejas *et al.*, (2014a) resumiéndose en: Caso A) Atacama, proyecto UchileCrea (Bip: 33-03-779, 33-03-218 y 30137081): un ahorro de agua de riego en uva de mesa entre 20 a 50%, con una rebaja promedio de 15.000 a 8.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en tres años de proyecto. La eficiencia del agua de riego (EUAr) se incrementó de 1.5 a 3.8 kg m<sup>-3</sup>, así como la eficiencia monetaria del uso del agua (EMUA) de 2.6 a 7.4 US\$ m<sup>-3</sup>. Caso B) Para el caso de O'Higgins, proyecto FIC (IDI: 30112430-0); se produjeron ahorros de agua de riego en cerezo, ciruelo europeo, duraznero, manzano y uva de mesa, en un promedio de 35.6%, con una rebaja de 8,401 a 5,413 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en tres años de

proyecto. La eficiencia del agua de riego (EUAr) se incrementó para todos los frutales. Caso C) O'Higgins, proyecto FIC (IDI: 30474710) donde se trabajó con productores de palta y cítricos; publicado en Beyá-Marshall *et al.*, (2021). En general se logró un ahorro promedio en el uso de agua de riego de 28% (2,640 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) y 40% (3,803 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), para la primera y la segunda temporada de trabajo, respectivamente; también se obtuvo un ahorro en el consumo eléctrico entre un 17 a un 23% y un aumento monetario del uso de agua de 22 a 35 %. Complementariamente, se desarrollaron estrategias de aplicación de diversos tipos de enmiendas orgánicas para mejorar la condición física del suelo y favorecer la exploración radical de los cultivos, generando incrementos en la calidad y los rendimientos.



#### 4.3.2. Región de Coquimbo, trabajo con Cooperativa Capel y empresa privada

Caso A) Cooperativa Capel. En el proyecto FIC-Limarí (BIP:30137738-0) se trabajó con 50 viticultores productores de uva para pisco, quienes por la gran sequía que estaban viviendo tenían disponible entre 3,400 y 3,800 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año, más las eventuales lluvias invernales. A pesar de todo, un 40% de los cooperados aumentó su eficiencia del uso del agua en un 14% y lograron una mejor distribución anual del agua disponible.

A lo anterior se suma un ahorro del 13% en los costos de energía eléctrica. Caso B) Cooperativa Capel, proyecto FIC-Choapa (BIP: 30404130-0) cuyos resultados se publicaron en Callejas *et al.*, (2019), lográndose un ahorro del 21% del agua de riego (cerca de 2,000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) sin afectar negativamente el potencial productivo de los viñedos, sino por el contrario, en la mayoría de los casos se incrementó. Se estimó un ahorro anual de 161,300 m<sup>3</sup> de agua de riego, considerando las 75 ha implicadas directamente en el estudio. El paquete tecnológico permite un significativo aumento de la EUA (45%), valorándose el esfuerzo de la Cooperativa Capel. Caso C) Empresa HC Ltda., 10 años de trabajo con este PT y un uso comercial del mismo en toda su superficie, logrando reducir el consumo de agua de 11,500 a 7,400 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en uva de mesa (cerca de 24 ha); de 8,700 a 5,500 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en 49 ha de Chirimoyo (*Annona cherimola* MILL); de 11,500 a 8,300 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en 28.5 ha de papayo (*Vasconcellea Pubescens* A.DC.); de 5,800 a 1,967 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en papas (entre 30 a 60 ha). En general los rendimientos por hectáreas se mantuvieron o incrementaron, pero en ningún caso disminuyeron.

#### 4.3.3. Región de Valparaíso, trabajo con pequeños productores de durazneros, damasco y uva de mesa

Proyecto FIC (BIP: 30350827), donde se trabajó con 20 productores de carozos y 60 productores de uva de mesa. A pesar de la baja disponibilidad hídrica entre el 2013 y 2015, en general hubo un ahorro de un 21.7 % del agua de riego y un 20.9% en los costos de energía eléctrica. En carozo se rebajó en promedio solamente de 6,182 a 5,810 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, dado que los huertos se encontraban en un valle (Putando) con muy baja disponibilidad de agua para riego.

En uva de mesa se logró una rebaja de 12,182 a 8,677 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, con un incremento en este último de un 11% en los rendimientos, sin disminuir la calidad de la fruta.

#### 4.4 Etapa 4. Promoción y adopción del PT

##### 4.4.1 Transferencia tecnológica

La adquisición del PT requiere de un gran esfuerzo en el fortalecimiento de la capacitación y acompañamiento de los productores que quieren usarlo en sus campos (de Janvry *et al.*, 2011). Si bien inicialmente se requiere presencia de técnicos capacitados en terreno, posteriormente al trabajar bajo la internet de las cosas (IoT) es factible apoyar en forma telemática la ejecución del riego en las plantaciones (Guerrero-Ibañez *et al.*, 2017). Este apoyo es independiente del tamaño del productor. Para el caso de las experiencias con los productores de uva pisquera, la Cooperativa Capel desarrolló un nuevo cargo, de manera de dar asesoría y acompañamiento permanente a los cooperados; en el resto de las experiencias, los beneficiados terminan capacitados en el uso de las tecnologías asociadas al PT, especialmente en el uso e interpretación de sensores de humedad de suelo.

##### 4.4.2 Falta de capacitación de asesores o técnicos

Una de las principales dificultades que se ha detectado, tiene que ver con el miedo y/o falta de interés en capacitarse por parte de asesores o técnicos que apoyan a grupos de productores, ralentizando el proceso de ingreso del PT. En algunos casos es por la edad, otras por la amenaza de su trabajo que ven en las tecnologías o “Agricultura 4.0”, pero se entiende que es una actitud que siempre es factible encontrar cuando se promueven nuevos PT (Rose *et al.*, 2016).

##### 4.4.3 Promoción y mejoras

Se han realizado varias gestiones para promocionar y mejorar este PT. A) En la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, se creó en el postgrado-magister un curso especial para formar a los nuevos ingenieros agrónomos en esta temática. B) Se siguen realizando memorias de título y tesis de magister, para ir mejorando o creando nuevas herramientas que se han desprendido del trabajo con el PT. C) Se han realizados un sin número de charlas a todo tipo de productores de fruta e inclusive en <https://www.youtube.com/channel/UC6sIMuWCyIM7QE8LCtpM7g>. D) Se ha hecho un esfuerzo especial en publicar los diversos resultados para que queden a disposición de cualquier interesado. E) Se está trabajando con las empresas que manejan o comercializan los diferentes equipos que forman parte de los sub-paquetes tecnológicos. D) Se están generando las primeras herramientas en plataformas IoT, para la gestión del riego y fertilizantes, basado en el PT presentado (FIA

PYT-2020-0445), denominado “Plataforma para la digitalización del manejo inteligente del riego y la fertilización en uva pisquera, basado en el cooperativismo y el internet de las cosas”.

#### *4.4.4 Retos futuros*

Uno de los principales desafíos es que el Estado promueva la formación de “Cooperativas Tecnológicas”, para que los productores puedan abordar en conjunto el acceso a las nuevas tecnologías o PT, así como la capacitación que requieren tanto ellos como los técnicos/asesores. Adicionalmente, se debe fortalecer el apoyo a los pequeños y medianos productores para facilitar las inversiones de nuevas tecnologías, dado que el ahorro de agua de riego que puede hacer la agricultura en un futuro de escasez hídrica, trae efectos positivos para toda la población del país. Otro reto que desarrollaría es el hacer gestión de agua a nivel de cuencas, coordinando a los diversos actores, no sólo a los productores agrícolas. Básicamente el ahorro de agua que estamos generando no sólo de seguridad de riego, sino un excedente para otros usos.

## **5. CONCLUSIONES**

Cerca de 20 años de trabajo del equipo UchileCrea, investigando, probando en terreno y validando en

conjunto con productores las nuevas tecnologías para el manejo del riego, ha permitido generar un PT que puede definir el tiempo y frecuencia de riego en forma óptima con la capacidad de apoyar a los agricultores a distancia. Las tecnologías implementadas han permitido mantener o mejorar los rendimientos, ahorrar entre 20 a 40% del recurso hídrico utilizado, aumentar la EUAR y en una similar proporción la energía eléctrica. Adicionalmente, este PT permite tener un programa probado para enfrentar la escasez hídrica que vive el país, enmarcado en el proceso de cambio climático, con impactos positivos a nivel de cuencas.

## **AGRADECIMIENTO**

El éxito de este PT no hubiera sido posible sin la ayuda de múltiples colaboradores y alumnos que se registran en los artículos citados. También se agradece a las diversas Instituciones Estatales chilenas relacionadas con la agricultura, así como del financiamiento de proyectos de investigación y desarrollo en el país, en especial: INDAP, CORFO, FIA y FIC. Finalmente, un especial reconocimiento a los productores que han colaborado con sus campos y tiempo en la implementación de nuevas innovaciones en el mundo del agro.

## **REFERENCIAS**

- Araya Osses, D., Casanueva A., Román Figueroa C., Uribe J. M. and Paneque M. 2020. Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics* 54:4309–4330.
- Balbontín, C., Campos I., Odi-Lara, M., Ibacache, A. & Calera, A. 2017. Irrigation Performance Assessment in Table Grape Using the Reflectance-Based Crop Coefficient. *Remote Sens.*, 9, 1276, 2-17.
- Banco Mundial. 2009. Chile: Fostering Technology Transfer and Commercialization, World Bank Open Knowledge Repository. Disponible online en <http://www.temoa.info/node/675019>.
- Bazán, R. 1977. Los paquetes tecnológicos, su preparación y utilización en la agricultura. Centro Agronómico Tropical de Investigaciones y enseñanza, Departamento de cultivos y suelos tropicales, Turrialba, Costa Rica. 10 p.
- Borra, S., Thanki R., & Dey N. 2019. Satellite image analysis: clustering and classification. Springer Briefs in Computational Intelligence. ISBN: 978-981-13-6424-2.
- Belmar, I., Fernández, A. & Leal, G. 2020. Efectos del otorgamiento de derechos de agua en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Ñuble, Chile Centro Sur. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(5), 225-273.
- Briones, V. 2015. Análisis retrospectivo del cambio tecnológico en la agricultura, el modelo productivo y la economía ecológica. *Revista Universidad y Sociedad [seriada en línea]*, 7 (3). pp. 126-132. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/>.

- Callejas R., Vera J., Rioseco M., Prohens F., Osorio H., Pino P., Navarrete J. y Gálvez R. 2014a. Generación e integración de tecnologías destinada al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. *Aqua-LAC - Vol. 6 - No 2*, pp. 71 – 83.
- Callejas, R., Vera J. y Kremer C. 2014b. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. *Serie Ciencias Agronómicas n° 28*, Universidad de Chile. 112 p.
- Carpio Santos, L. 2018. El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista De Producción, Ciencias E Investigación*, 2(14), 25–32.
- Casanova, M. Salazar O., Seguel O. and Luzio W. 2013. *The soils of Chile*. Publisher: Springer Netherlands. 183 pag.
- Castañeda, C., M. Martínez, F. Pascual, H. Flores, D. Fernández, S. Esparza. 2015. Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego río Yaqui, Sonora, México. *Agrociencia*, 49(2), 221-232.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. 2015. Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. 26 p. 05/05/2018. <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. 2020. Actualización Balance Hídrico Nacional: Disponibilidad de agua en el norte y centro de Chile podría disminuir más de un 50 por ciento (El Desconcierto). <http://www.cr2.cl/actualizacion-balance-hidrico-nacional-disponibilidad-de-agua-en-el-norte-y-centro-de-chile-podria-disminuir-mas-de-un-50-por-ciento-el-desconcierto/>. (Consultado en abril 2021)
- Comisión nacional de Riego (CNR). 2009. Análisis comparado entre conducción entubada y conducción abierta en canales de riego – Proyectos Civiles e Hidráulicos Ltda. 233 p.
- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdiou D., Pierre J. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Ann. Bot.*, 87, 477-483.
- De Janvry A., Dunstan A and Sadoulet E. 2011. Recent advances in impact analysis methods for ex-post impact assessments of agricultural technology. Options for the CGIAR. Workshop: Increasing the rigor of ex-post impact assessment of agricultural research: A discussion on estimating treatment effects. Consultative Group on International Agricultural Research. California, USA. 40 p.
- Dirección General de Aguas (DGA), División de Hidrología. 2017a. Pronóstico de caudales de deshielo temporada de riego. 2017-2018. División General de Aguas. Santiago. 19 p.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2017b. Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas. Actualización del balance hídrico nacional. Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 378 pág.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2020. Información Pluviométrica, Fluviométrica, Estado de Embalses y Aguas Subterráneas. Boletín DGA N° 512. Santiago, Chile. Disponible en [https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin\\_dicie\\_mbre\\_2020.pdf](https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin_dicie_mbre_2020.pdf) (Consultado en marzo de 2021).
- FDI-CORFO-Universidad de Chile. 2004. Riego y fertirrigación: innovación y cambios tecnológicos en el uso racional del agua de riego y fertilización en la optimización del manejo de parronales en el Valle de Copiapó. FDI-CORFO 04 CR 10 PAD – 01. 2004-2007.
- Fernández I., S. Lecina, M. C. Ruiz-Sánchez, J. Vera, W. Conejero, M. R. Conesa, A. Domínguez, J. J. Pardo, B. C. Lélis and P. Montesinos. 2020. Review Trends and Challenges in Irrigation Scheduling in the Semi-Arid Area of Spain. *Water* 785, 2-26.
- Ferreira, R., Sellés G., Silva H., Ahumada R., Muñoz I. y Muñoz V. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7):1109-1118.

- Ferreira, R. y Sellés G. 2014. Manual de riego para especies frutales. Uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. Boletín INIA-N°278. 320 p.
- Fundación Chile. 2018. Resumen estratégico radiografía del agua. Brecha y riesgo hídrico en Chile Chile. Escenario Hídrico 2030 Chile, Resumen Estratégico. 38 p.
- Fundación para la innovación agraria (FIA)-Universidad de Chile. 2003. Desarrollo de un modelo del crecimiento y una metodología de evaluación de las raíces de la vid, a nivel de campo, como base para el incremento sustentable de la productividad de los parronales de uva de mesa. FIA-PI-C-2003-2006, 1-A-037.
- Fundación para la innovación agraria (FIA). 2008. Tecnologías Aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. 102 p. Fundación para la Innovación Agraria, Santiago, Chile, Primera edición, diciembre de 2008 Registro de Propiedad Intelectual N° 176.826 SBN N° 978-956-7874-90-3.
- Fundación para la innovación agraria (FIA). 2015. Eficiencia hídrica. Innovaciones para hacer frente al principal desafío que impone el cambio climático. FIA-Gobierno de Chile. 112 p.
- Fundación para la innovación agraria (FIA). 2019. Proyecto de innovación, convocatoria nacional 2019, bases técnicas y administrativas. FIA-Gobierno de Chile. 39 p.
- Gálvez R., Callejas R., Reginato G. and Peppi M.C. 2014. Irrigation schedule on table grapes by stem water potential and vapor pressure deficit allows to optimize water use. *Ciência Téc. Vitiv.* 29(2) 60-70.
- Gordillo Salinas, V. M., Flores Magdaleno, H., Tijerina Chávez, L., & Arteaga Ramírez, R. 2014. Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(1), 143-155.
- Guerrero-Ibañez, J., Estrada-González F., Medina-Tejeda M., Rivera-Gutiérrez Ma., Alcaraz-Aguirre J., Maldonado-Mendoza C., Toledo-Zuñiga D., López-González V. 2017. SGreenH-IoT: Plataforma IoT para Agricultura de Precisión. *Sistemas, Cibernética e Informática* 14 (2): 53-58.
- Grimes, D. and Williams L. 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson Seedless grapevines. *Cropscience*. 30: 255-260.
- Gurovich L. 2001. Riego superficial tecnificado. 4ª edición. Ediciones Universidad Católica de Chile. 616 p.
- Martín de Santa Olalla, F. López P. y Calera A. 2005. Agua y Agronomía. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 606 p.
- Munizaga, S. 2019. Efecto del déficit hídrico mediante desecamiento parcial de raíces en vid variedad Red Globe sobre el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua. Memoria de Título, Universidad de Chile, Fac. Cs. Agr. Santiago, Chile, 38 p.
- Naor A. 1998. Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody. *J. Hortic. Sci. Biotech.*, 73, 431-436.
- Naranjo, M. 2004. Innovación y desarrollo tecnológico: Una alternativa para los agronegocios. *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. VIII, 14: 237-250.
- Navarrete, J. 2012. Efecto de distintos criterios de riego sobre variables fisiológicas y parámetros productivos de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) variedad Red Globe. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 73 p.
- Odi-Lara, M., Campos, I., Neale, C., Ortega-Farías, S., Poblete-Echeverría, C., Balbontín, C., Calera, A. 2016. Estimating Evapotranspiration of an Apple Orchard Using a Remote Sensing-Based Soil Water Balance. *Remote Sens.* 8, 253.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2019. Panorama de la agricultura chilena. [https://www.odepa.gob.cl/panorama\\_2019/54/](https://www.odepa.gob.cl/panorama_2019/54/). 152 p. (consultado en abril 2021).
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2020. Catastro frutícola <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/catastros-fruticolas/catastro-fruticola-ciren-odepa>. (consultado en abril 2021).

- Olivo N., Girona J. and Marsal J. 2009. Seasonal sensitivity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrigation Sci.*, 27, 175-182.
- Orellana, D. 2017. Análisis de los efectos de una mega-sequía sobre la generación hidroeléctrica en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago: Universidad de Chile. 68 pag.
- Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura, UNESCO. 2010. Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe. Proyecto “Elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y el Caribe”. Documentos técnicos del PHI-LAC, N°25. Montevideo, Uruguay. 48p.
- Pôças I., Paço, T. A., Paredes, P., Cunha, M., & Pereira, L. S. 2015. Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing*, 7(3), 2373-2400.
- Rosati A., Metcalf S., Buchner R., Fulton A. and Lampinen B. 2006. Tree water status and gas exchange in walnut under drought, high temperature and vapour pressure deficit. *J. Hortic. Sci. Biotech.*, 81, 415-420.
- Rose, D., Sutherland W. J., Parker C., Lobleyc M., Winter M., Morris C., Twining S., Ffoulkes Ch., Amano T. and Dicks L. V. 2016. Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems* 149; 165–174.
- Sandoval, J. 2003. El riego en Chile. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. 94 p.
- Santibáñez F. y J. Uribe. 1993. Atlas agroclimático de Chile, regiones VI, VII, VIII y IX. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, Chile. 99 pp.
- Santibáñez, F. 2017. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. p. 147 a 178. En: ODEPA, Reflexiones y desafíos al 2030: Perspectivas de especialistas externos. Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. 294 p.
- Sentek, 2021. Easy Installation, Accurate Soil Moisture, Salinity And Temperature Measurement. <https://sentektechnologies.com/product-range/soil-data-probes/drill-and-drop/>.  
<https://sentektechnologies.com/product-range/soil-data-probes/enviroscan/>
- Sackel K., Ahmadi H., Biasi W., Buchner R., Goldhamer D., Gurusinghe S., Hasey J., Kester D., Krueger B., Lampinen B., McGourty G., Micke W., Mitcham E., Olson B., Pelletrau K., Philips H. Ramos D., Schwankl L., Sibbett S., Snyder R., Southwick S., Stevenson M., Thorpe M., Weinbaum S., Yeager J. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7, 23-29.
- Seguel, O., Beyá-Marshall, Baeza, B. 2021a. Uso de enmiendas para mejorar las condiciones físicas de suelo. pp: 26-40. En: Beyá-Marshall, V., Galleguillos, M. (eds.). Optimización del riego en paltos y cítricos. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 34.
- Seguel, O., Hardy, Ch., Alfaro, F., Pastenes, C. (eds.). 2020. Estrategias de gestión del riego para aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas. Experiencias frente al proceso de aridización. Universidad de Chile- FIA. Santiago, Chile. 87 p.
- Shakel K., 2011. A Plant-based approach to deficit irrigation in trees and vines. *Hortscience*, 42, 173-177.
- Silva, A. 2011. Conocimiento, uso actual y futuro del paquete tecnológico, promovido por el P4P para frijol, postrera, 2009. Tegucigalpa: IICA, 54p.
- Torres, Y., Rivas J., De Pablos-Heredero C., Perea J., Toro-Mujica P., Angón E. y García A. 2014. Identificación e implementación de paquetes tecnológicos en ganadería vacuna de doble propósito. Caso Manabí-Ecuador. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 5(4):393-407.
- Villalobos, P., Manríquez R., Acevedo C. y Ortega S. 2009. Alcance de la agricultura de precisión en Chile: estado del arte, ámbito de aplicación y perspectivas. Estudio encargado por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) del Ministerio de Agricultura. 114 p.
- Vera, J., Mounzer O., Mendoza R. y Megna A. 2004. Riego Inteligente. *Rev. de Riegos y Drenajes*, 134: 64-69

- Veihmeyer, F.J. and Hendrickson, A. H. 1950. Soil moisture in relation to plant growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1:285-304.
- Williams, L. 2000. Grapevine water relations. p. 121–126. In: Christensen, L.P. (ed.). *Raisin production manual*. Publication n° 3393. Univ. California, Oakland, C.A.
- Williams, L. and Trout, T. 2005. Relationships among vine-and soil-based measures of water status in a Thompson Seedless vineyard in response high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56 (4): 357-366.

*Como citar este artículo:*

Callejas-Rodríguez R., y Seguel, O. (2021). Paquete tecnológico UchileCrea para el control sustentable del riego en sistemas frutícolas. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 128-142. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-09



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

Redes del Programa Hidrológico Intergubernamental  
para América Latina y el Caribe

## Spatial and temporal behavior of annual maximum sub-hourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile

*Comportamiento espacial y temporal de las intensidades máximas anuales subhorarias de precipitación para duraciones desde los 15 minutos a 24 horas en Chile Central*

Claudia Sangüesa<sup>1\*</sup>, Diego Rivera<sup>2</sup>, Roberto Pizarro<sup>1</sup>  
Pablo García-Chevesich<sup>3</sup>, Alfredo Ibáñez<sup>4</sup>, Juan Pino<sup>5</sup>

Artículo por invitación  
del Consejo Directivo

\* Autor de correspondencia

### Resumen

La intensidad máxima de lluvia es un factor importante de analizar a la hora de determinar si se han producido cambios temporales y espaciales. Se utilizaron los datos recolectados de once pluviógrafos para determinar las intensidades máximas anuales de precipitación para la Región del Maule (centro de Chile), para duraciones desde los 15 minutos hasta las 24 horas, entre los años 1974 y 2009. A cada serie se aplicaron pruebas estadísticas de posición y dispersión junto con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para identificar tendencias. Los resultados mostraron que las intensidades más altas ocurrieron en las estaciones con mayor influencia orográfica y en áreas cercanas a cuerpos de agua. Además, el análisis estadístico reveló que las intensidades máximas de lluvia no muestran tendencias espaciales o temporales en el periodo estudiado. En cambio, los resultados sugieren que las intensidades se han mantenido estables dentro de rangos históricos y no han manifestado cambios importantes en el territorio en estudio.

**Palabras clave:** Intensidades máximas de lluvia sub-diaria; Intensidades máximas de lluvia sub-horaria; Tendencia de las intensidades de lluvia; Comportamiento espacial de las intensidades de lluvia.

### Abstract

*Maximum rainfall intensity is an interesting factor to analyze when determining whether temporal and spatial changes have occurred. Data gathered from twelve rain gauges were used to determine annual maximum rainfall intensities for the Maule Region (central Chile), for durations from 15-minute to 24-hour durations, between 1974 and 2009. Statistical tests of position and dispersion were applied to this dataset, along with the non-parametric Mann-Kendall test to identify tendencies. Results showed that the highest intensities occurred at gauging stations with greater orographic influence and in areas near bodies of water. Additionally, the statistical analysis revealed that maximum rainfall intensities did not seem to show spatial or temporal tendencies through time. Instead, results suggest that intensities have remained stable within historic ranges and have not manifested important changes.*

**Keywords:** *Maximum sub-daily rainfall intensities; Maximum sub-hourly rainfall intensities; Trend of rainfall intensities; Spatial behavior of rainfall intensities.*

- 
- 1 Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca, Chile; claudiasanguesa@gmail.com, rpizarro@uta.lca.cl,
  - 2 Centro de Sustentabilidad y Gestión Estratégica de Recursos (CiSGER), Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo, Las Condes 7610658, Chile. diegorivera@udd.cl
  - 3 Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado School of Mine, Denver, United States; pablogarciach@gmail.com
  - 4 Consultor independiente. alfredoibacor@gmail.com
  - 5 Dirección de Transferencia Tecnológica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile. juan.pino@ute.m.cl

## 1. INTRODUCTION

The Maule region in Chile (34°41' S and 36°33' S) shows a Mediterranean climate and experiences average annual precipitation fluctuating between 600- and 2,300-mm. Annual precipitation increases southward and with terrain elevation. It shows a strong seasonality with a dry summer and 5 months (May to September) concentrating up to 90% of the total annual precipitation (Carrasco *et al.*, 2005; Valdés-Pineda *et al.*, 2013). Winter precipitation occurs due to extratropical fronts arriving to the continent when the Pacific Anticyclone and the midtrack low pressure areas are in their northern position (Garreaud *et al.*, 2009; Valdés-Pineda *et al.*, 2013). Rainfall patterns are related to the dynamics atmospheric processes such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) (González 2016). The warm phase in central Chile (between 30°S and 35°S) is associated with an increase in winter rainfall (Ortlieb, 1994; Barrett *et al.*, 2009). Nevertheless, in non-ENSO conditions there are several processes that generate rainfall variability in winter, such as blocking and orographic effects (Montecinos *et al.*, 2011).

Both, the distribution and intensity of precipitation, as well as geomorphology, among other aspects, determine the sensitivity of the territory to meteorological hazards triggered by rainfall, such as flooding of riverbeds, floods, alluvial floods, avalanches, landslides, and swells on coasts (Unesco, 2012). As hydro-climatological events affect social and natural systems, understanding potential changes on frequency, intensity, and duration of extreme events could provide to decision makers with strategies for mitigation and adaptation (Singh *et al.*, 2013; Zubieta & Saavedra, 2009). For instance, the rainfall intensity used for designing waterworks -the maximum value of precipitation expected to occur in a given time frame and associated with a certain return period- is crucial. Rainfall intensity values are obtained from the analysis of records kept by traditional pluviographic stations that register the amount of precipitation over time on a strip of paper, also known as a "pluviographic strip chart". In Chile, these records are traditionally collected weekly, though there are also daily and monthly records. However, it is unknown whether current gauging networks suffice to capture changes in precipitation patterns, or how current design parameters will be affected by short-term variability and long-term changes.

It is assumed that precipitation intensities in Chile have changed over the last 35 years, as this variable detects the presence of changes in the behavior of rainfall patterns, both temporally and spatially (Jacques-Coper & Garreaud, 2015). Several authors have suggested that precipitation intensities have increased in recent years in several parts of the world, along with the consequences of such increase, including changes to the temporal distribution of rainfall and changes in the impact on precipitation-runoff processes (Dhakai & Tharu, 2018; Bartolini *et al.*, 2017; Fowler & Hennessy, 1995; Gong & Wang, 2000). Other authors suggest that the increasing trend for intensity of rainfall mostly emerges on shorter time frames (less than an hour), since at such scale rainfall is more sensitive to local atmospheric changes (Westra *et al.*, 2014; IPCC, 2007; Beck *et al.*, 2015). For the specific case of Chile, Jacques-Coper & Garreaud (2015) documented that, beginning in the year 1976, there was a change in rainfall patterns within the country (mainly south of 44°S latitude), suggesting a differential situation that should be detectable by statistical methods and mathematical analyses that evaluate the behavior of climatic data. The Maule Region exhibits Mediterranean features, such as sub-humid Mediterranean, highland temperate rainforest, and warm-temperate (DMC, 2001), defining in time and space rainfall patterns, which, as has been pointed out, show notable differences in mean annual rainfall. Pizarro *et al.* (2008) characterized rainfall behavior using 63 pluviographic stations along Chile (15 of them located in the Maule region), concluding that annual precipitation tends to increase latitudinally, with the highest precipitation values being recorded in the Andean mountain range. On revising rainfall's temporal trends, a decreasing trend of rainfall was observed during the 1990s with a strong decadal variability (Quintana & Aceituno, 2012). Regarding the temporal concentration of rainfall, this has not been manifested as a change in annual rainfall structure. Pizarro *et al.* (2008) also points out that there are clear spatial patterns and temporal trends for climate aggressiveness, the Fournier Index (FI), the Modified Fournier Index (MFI), and the Precipitation Concentration Index (PCI) derived by Oliver (1980). However, increases in the annual amount of rainfall tend to increment FI and MFI, meaning that as the annual amount of precipitation increases, and so does climate aggressiveness. Similarly, it can be assumed that a higher amount of annual rainfall tends to cause a decrease in rainfall concentration, thus causing a



decrease in PCI (Pizarro *et al.*, 2008). Also, recently, Sangüesa *et al.* (2018) analyzed daily and monthly records from 89 pluviometric stations in the 1970-2016 period, in a geographical area enclosed by latitudes 29°12'S and 39°30'S. In that study, 18 out of 19 rainfall stations showed increasing trends on daily rainfall concentration as estimated by the GINI index. For monthly data, 16 out of 19 rainfall stations show increasing values for the Precipitation Concentration Index. Thus, differences between daily and monthly concentration trends poses a question regarding changes at sub-daily scales. The analysis of rainfall intensity can often become costly and complex. Data comes mostly from pluviographic strips for a limited number of stations, at different geographical areas. Obtaining rainfall intensity records has normally been considered a tedious process, being limited to durations larger than 1 hour, due to the difficulty of estimating the intensities with human eyes when analyzing paper strips (Deidda *et al.*, 2007; Jaklič *et al.*, 2016). In fact, most pluviographic stations in the country record rainfall data in strip charts using graph paper on a weekly basis. The dimensions of charts are approximately 44 by 13 cm, where 2 hours of rain are denoted by a 5 mm line drawn horizontally. This explains why it has been possible to obtain measures of precipitation up to a minimum period of 1 hour in visual form. Moreover, Unesco (2007) determined the maximum annual intensities and the rainfall intensity-duration-frequency (IDF) curves for stations located in several regions within the country in this same visual form, which, aside from being a long and tedious process, it does not allow for retrieving values for durations of less than 1 hour. This study analyzes temporal and spatial behaviors of rainfall intensities, for different durations, in order identify changes and trends over the last decades..

## **2. METHODOLOGY**

### *2.1. Study Area*

The study was conducted in the Maule region, located in the south-central zone of Chile. The Maule region is located between latitudes 34°43' S and 36°32' S, enclosing 30,296 km<sup>2</sup> (Figure 1). Its climate is largely Mediterranean, but it varies West-East (from the coast to the Andes), becoming more humid closer to the Andes mountain range.

The Maule region has limited rainfall records, with a total of 18 meteorological stations possessing a

continuous data through weekly pluviographic strip charts (Figure 1). Beginning in 2010, stations using pluviographic strip charts were replaced by stations with continuous digital recording systems. Newer stations were set to deliver information discretely every hour, due to the high volume of data that would otherwise be generated if records were taken every 0.2 mm of rainfall. This change has led to a reduction in the temporal resolution of available information, as records are taken hourly in integer values, losing inter-annual data and data recorded in durations of less than 1 hour. For the case of the Maule region, the 18 pluviographic stations have continuous strip charts from 1960 until 2009, although several of these stations have periods with a substantial lack of information (Figure 1). Therefore, pluviographic stations used in this study were located mainly in the central valley and at the foothills of the Andes, at elevations varying from 55 to 668 m.a.s.l. Annual precipitation in the area varies from 599 to 2,172 mm (Figure 1).

### *2.2 Data Processing*

The Technological Center for Environmental Hydrology at the University of Talca developed a pluviographic strip chart processor that allows for the digitization and processing of weekly records (Unesco, 2013). The device interprets the line drawn by the pluviograph and uses the numerical values to obtain the maximum rainfall over time (Figure 2). The maximum resolution that can be obtained is 15 minutes, due to the line width. Even so, this tool allows for the gathering of information not previously counted and provides greater certainty regarding quantitative data estimations. The study used pluviographic strip charts collected from 18 pluviographic stations located in the Maule region. The stations belong to one of the following 3 institutions: General Water Directory (DGA), the Chile's Meteorological Directory (DMC), and the National Electricity Company (ENDESA). The quantity of archived records varied as the station with the largest recording time has 44 years of data, while the station with the smallest records has 15 years (Figure 1). In addition to the above, some of these stations were closed in the 1990s, mostly those located at the foothills of the Andes. For the purpose of this study, only records between 1974 and 2009 were considered, as this period included the largest number of stations with continuous data. Thus, data collected in a 36-year period were obtained from a total of 11 pluviographic stations (Figure 1).

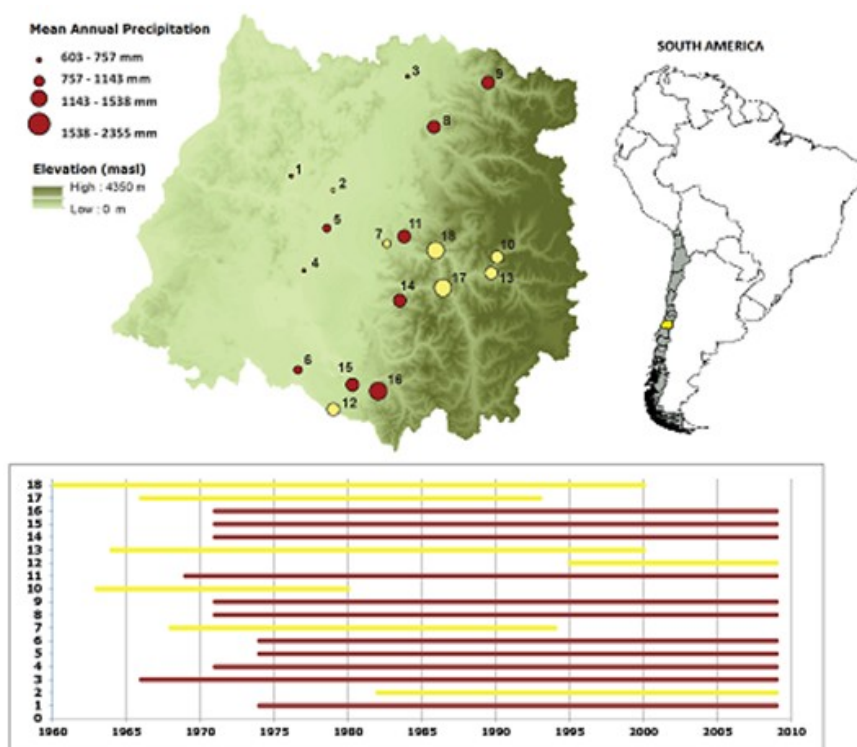


Figure 1. Available pluviographic stations in the Maule region and their time spans. The stations used in the study are shown in red, while those shown in yellow were not included in the study due to a lack of continuous information over time. Stations: 1: Pencahue, 2: Talca, 3: Curicó, 4: Melozal, 5: San Javier, 6: Parral, 7: El Lirio (Colbún), 8: Potrero Grande, 9: Los Queñes, 10: Desagüe Laguna Invernada, 11: Colorado, 12: San Manuel en Perquilauquén, 13: Casa Maquinista, 14: Ancoa Embalse, 15: Digma Embalse, 16: Bullileo Embalse, 17: Melado en la Lancha, and 18: Armerillo

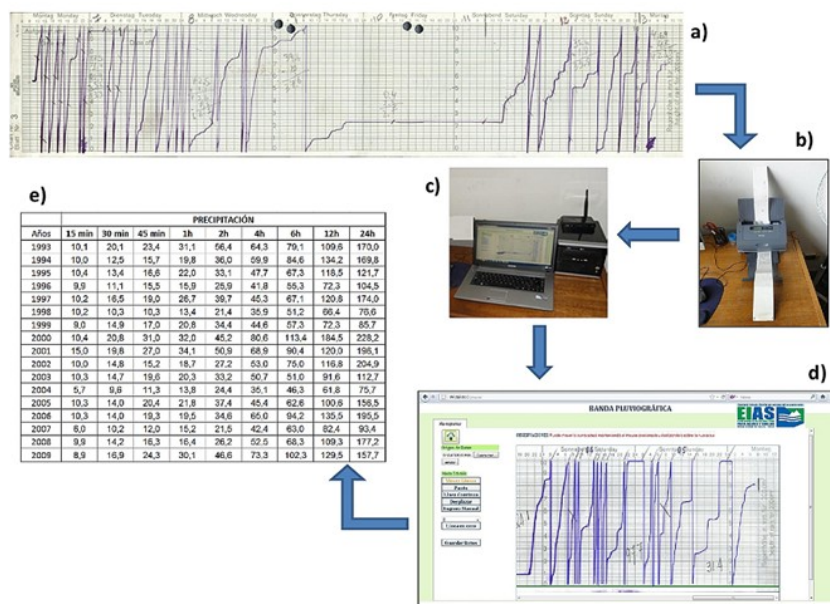


Figure 2. Flowchart of the pluviographic strip chart processor: a) Weekly pluviographic strip chart; b) Automatic feed scanner; c) Software application used to process charts; d) Processed strip chart; e) Data table generated by the processor and sorted on an electronic screen

The pluviographic charts for 10 of the selected stations were weekly strip charts, while those from the remaining stations were monthly strip charts. In order to identify the maximum annual intensity value of a defined duration, continuous sampling was conducted in the selected interval, with a displacement time of 5 minutes, so the cumulated rainfall was recorded in that time interval. Thus, time series were built by picking the highest intensity for each year. With the resulting data, it was possible to analyze the behavior of annual maximum rainfall intensities for durations of 15, 30, and 45 minutes, as well as for 1, 2, 4, 6, 12, and 24 hours, for stations located in the Maule region, with the exception of the Curicó station, where intensities with durations of less than one hour could not be obtained due to the format of its pluviographic strip charts. In order to describe the behavior of the annual maximum intensities, inferential and descriptive statistics were used for each duration: (1) An exploratory data analysis (boxplot) was conducted in order to depict the distribution of the intensity values of each data series, each duration, and for the 11 stations considered. The stations were sorted in terms of their average annual rainfall; (2) The mean, standard deviation, and coefficient of variation were calculated for all stations. The values were placed on a map to analyze the variability with respect to spatial

location. Additionally, the Alexandersson's homogeneity test (Alexanderson, 1986) was applied to all time series and all durations; (3) Annual maximum rainfall intensities for different durations were correlated with annual rainfall using the Pearson's correlation coefficient; (4) Afterwards, temporal trends of the maximum annual intensities were analyzed for each duration and station examined, with the purpose of determining whether the variable had shown significant changes in tendencies over the 36-year study period. This analysis was conducted using the non-parametric Mann-Kendall test. This test verifies the existence of tendencies (positive, negative, or none), while also determining the trend's statistical significance to a certain level of confidence; (5) The complete set of records (1974-2009) was further split into two subsets (1974-1991 and 1992-2009), and a Gumbel distribution was fitted to obtain return periods of 20 years for each one of the 9 durations previously listed. For the calculation of the Mann-Kendall test, it is required the Kendall's S-statistic and its variance VAR(S). With both values, the standardized Z-value can be obtained when the sample size is greater or equal to 8 (Yue, Pilon, & Cavadias, 2002). The sign and value of the Z-value determines the orientation and meaning of the derived tendency, respectively. For the S-statistic, the following equation was used:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \tag{1}$$

where the function's  $\text{sign}(x_j - x_k)$  is defined as:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_k < 0 \end{cases} \tag{2}$$

where  $x_j$  and  $x_k$  are consecutive values of the variable being studied. Then, the variance  $VAR(S)$  is defined as:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \tag{3}$$

Using both values, the Z-value was calculated using one of the following equations, depending on the S-value:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}; & \text{if } S > 0 \\ 0; & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}}; & \text{if } S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

Once the Mann-Kendall's Z-values were obtained, a qualitative spatial analysis was conducted. In addition to the above, three time periods were determined for each series: 1974-1991, 1992-2009, and the complete period (1974-2009). The Gumbel's probability distribution function was adjusted using the Method of Moments to each time period, determining the value to be reached by the variable "intensity", for a 20-year return period, i.e.  $P(x \leq X) = 0.95$ , for all durations (Pizarro *et al.*, 2013).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The values obtained for the maximum annual rainfall intensities, in mm/h, for the 9 durations previously listed, are shown in Figure 3. Average values were included, along with the maximum and minimum of each series, showing the high variability of the data over the years. As can be observed in Figure 3, among the average annual maximum rainfall intensity values of each duration, Penciahue was the

station with the lowest intensity (19 mm/h), whereas Bullileo was the station with the greatest intensity (31.4 mm/h). For maximum values in each series are analyzed instead, other stations, as the Digua Embalse, showed maximum values for the 15- and 30-minute durations of 77.0 and 45.4 mm/h, respectively. Thus, highest intensities were found at the Andes' foothills, while lower values were in the west part of the central valley. Therefore, the spatial patterns of annual maximum rainfall intensities showed a decreasing mountains-to-coastal gradient, most likely due to a strong orographic influence and corroborating the findings by Garreaud (2009).

An exception to the above was the Melozal station, which despite of being located in the central valley and far from any body of water, it registered a maximum value for 15-min duration of 64.5 mm/h, being it the third highest value. This is relevant when considering the design rainfall intensity for hydraulic works.

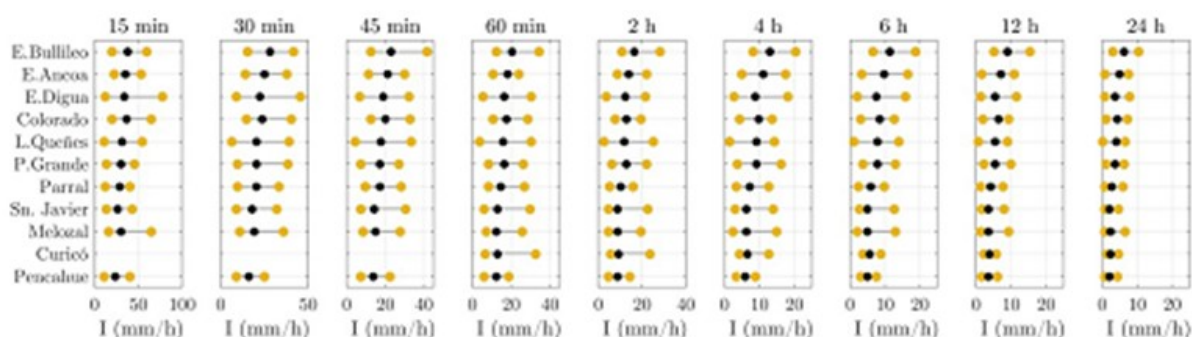


Figure 3. Annual maximum intensity values for durations of 15, 30 and 45 min and 1, 2, 4, 6, 12, and 24 h for the 1974-2009 period

In terms of the standard deviation (Figure 4), the highest values were located in the area with the highest elevations, where annual rainfall and their intensities are greater. Upon analyzing the coefficient of variation linked to the intensities of each duration, a variation between 0.28 (45-minute duration) and 0.41 (24-hour duration) was observed (Figure 5). In general, it was observed that as the duration increases, the coefficient of variation tends to increase slightly, especially for durations greater than 1 hour. When establishing a relationship between annual maximum rainfall intensities and mean annual rainfall for each station, a positive correlation between both variables was observed. Highest

correlation (0.4) was found for 24-hour durations, while 15-minute durations showed the lowest correlation value (-0.27, Figure 6). Despite the above, once the correlation coefficient was calculated, the values obtained were low (rarely rising above 0.5). Even for the Colorado station, the coefficient became negative for the 15-min duration and 0 for the 30-min duration. It is also noteworthy that Los Queñes station had a correlation of 0.58 for the 15-min duration, which contradicts the assumption that the sub-hourly intensities would be more connected to an orographic phenomenon than frontal systems. Stations Parral, Bullileo, and Los Queñes showed correlation values above 0.5 for 24-hour durations

(0.58, 0.53 and 0.52, respectively). In relation to the boxplot graphs, as the amount of annual maximum rainfall increased, the intensities tend to increase for the different durations considered in this study (Figure 7). Similarly, the highest intensities were reached in stations experiencing greater orographic influence (i.e. those located in the foothills of the Andes), as well as those near bodies of water, as previously mentioned, corroborating the studies conducted by Pizarro *et al.* (2013). In addition to the above, it was observed that, among the durations greater than 1 hour, 2 groups of stations could be distinguished. The first group is composed by stations located in the Central Valley (Pencahue, Curicó, Melozal, San Javier, and Parral), whereas the second is composed by stations located at the foothills of the Andes (P. Grande, Los Queñes,

Colorado, Ancoa E., Digua E. and Bullileo E.). The central valley group of stations showed less rainfall, while simultaneously having lower annual maximum rainfall intensities (stations Pencahue, Curicó, Melozal, San Javier, and Parral). It should be noted that Parral, which had one of the highest annual rainfalls for the central valley (1,000 mm/year), was not among the highest rainfall intensities. The Bullileo station was the station that showed the highest intensities for all durations, emphasizing the small dispersion of its data, as well as the large number of outliers for 15-minute durations. A possible explanation of such behavior is the fact that the station is located very close to a body of water (the Bullileo reservoir), agreeing, once again, with the findings by Pizarro *et al.* (2013).

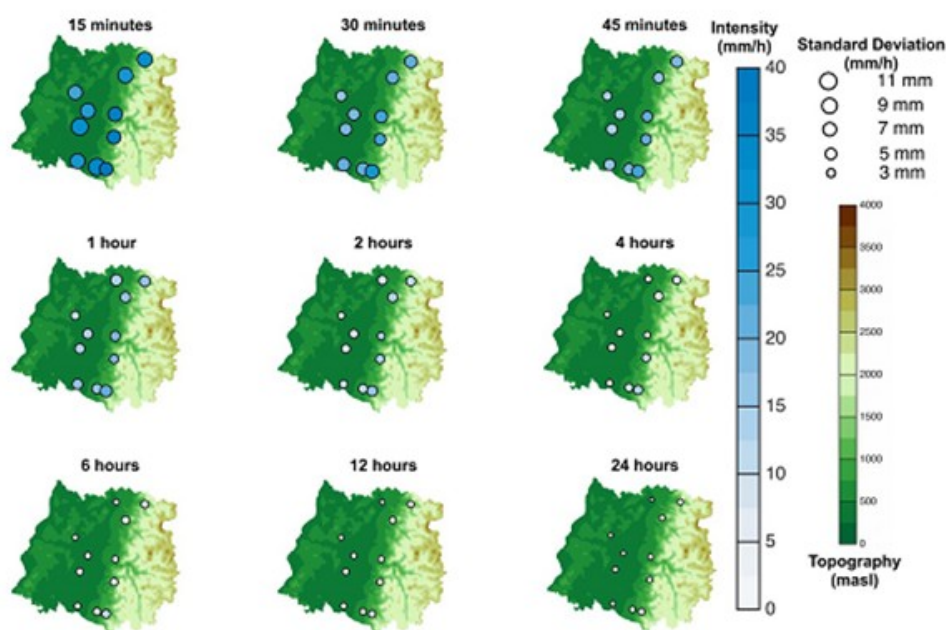


Figure 4. Maximum annual rainfall intensities for different durations, as mean values and their respective standard deviation, between the 1974-2009 period

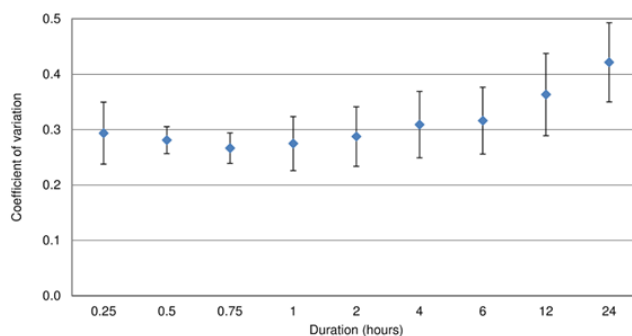


Figure 5. Coefficients of variation for annual maximum intensities, for each duration, calculated with mean values from all stations, for the 1974-2009 period

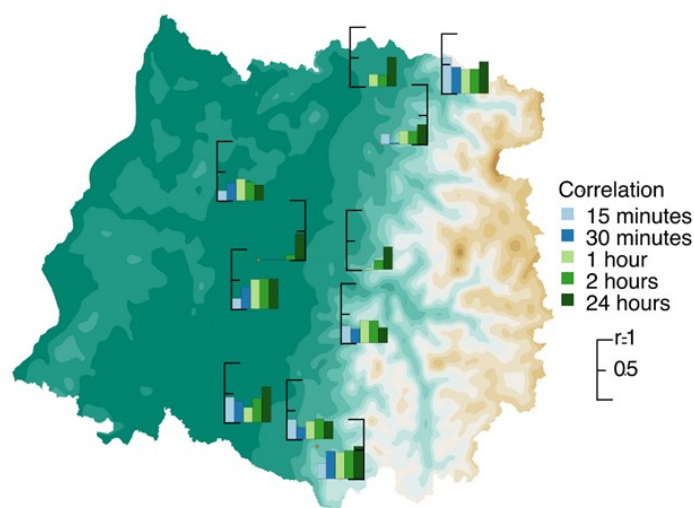


Figure 6. Correlation coefficients between the annual maximum intensity and annual precipitation for durations of 15 minutes and 1, 2, and 24 hours, between 1974 and 2009

In relation to the boxplot graphs, as the amount of annual maximum rainfall increased, the intensities tend to increase for the different durations considered in this study (Figure 7). Similarly, the highest intensities were reached in stations experiencing greater orographic influence (i.e. those located in the foothills of the Andes), as well as those near bodies of water, as previously mentioned, corroborating the studies conducted by Pizarro *et al.* (2013).

In addition to the above, it was observed that, among the durations greater than 1 hour, 2 groups of stations could be distinguished. The first group is composed by stations located in the Central Valley (Pencahue, Curicó, Melozal, San Javier, and Parral), whereas the second is composed by stations located at the foothills of the Andes (P. Grande, Los Queñes, Colorado, Ancoa E., Digua E. and Bullileo E.). The central valley group of stations showed less rainfall, while simultaneously having lower annual maximum rainfall intensities (stations Pencahue, Curicó, Melozal, San Javier, and Parral). It should be noted that Parral, which had one of the highest annual rainfalls for the central valley (1,000 mm/year), was not among the highest rainfall intensities.

The Bullileo station was the station that showed the highest intensities for all durations, emphasizing the small dispersion of its data, as well as the large number of outliers for 15-minute durations. A possible explanation of such behavior is the fact that the station is located very close to a body of water

(the Bullileo reservoir), agreeing, once again, with the findings by Pizarro *et al.* (2013).

For 15-minute, 30-minute, 1-hour, and 2-hour rainfall durations, annual maximum rainfall intensities occur more frequently during winter months (May, June, and July), although it is noteworthy that summer months showed a negligible frequency of intensities (Figure 8). This fact is relevant for planning in the face of extreme events, such as floods and landslides.

Based on the Mann-Kendall analysis (Figure 9), the Digua Embalse station stood out as it showed a positive and significant trend ( $p < 0.05$ ), for durations ranging from 15 minutes to 2 hours. However, the behavior of this location obeys to local-scale characteristics, not suggesting a spatial pattern (Pizarro *et al.*, 2013).

The stations Parral, Melozal, Pencahue, and Colorado, on the other hand, showed negative trends for all durations, but very few of them were significant. Results from the analysis indicate that other stations had mostly negative, non-significant, trends except for Pencahue and Potrero Grande, which tended to show positive, non-significant trends. Given the above, it can be said that, from an annual perspective, there are no clear rainfall behavior patterns within the study area.

A total of 96 time series were tested for data derived from 11 stations (10 with 9 durations, and 1 station with 6). Among them, 62 (64.6%) were negative trends and 34 (35.4%) were positive trends.

However, it is worth noting that, over a 36-year period, only 13 (13.5%) of the trends were significant, 6 of which (6.3%) were positive and the remaining 7 (7.3%) were negative (Figure 10). In other words, it is not possible to say that annual maximum rainfall intensities have changed; in fact, most series (77%) showed that rainfall intensities for durations between 4 and 24 hours have decreased. In terms of rainfall durations shorter than 60 minutes, the number of positive and negative tendencies were similar (46% and 54%, respectively), even though other studies suggest that short-term rainfall

intensities are increasing (Westra *et al.*, 2014; Vasiljevic, McBean, & Gharabaghi, 2012; Valdés-Pineda *et al.*, 2013). Differences on trends and spatial distribution must be closely analysed in order to unravel potential changes on the direction, trajectories and precipitable water. Also, preliminary results suggest that maximum intensities within the year also occur during summer time, having a potential effect on the design of waterworks and irrigations system, but also affecting the preparedness of productive systems.

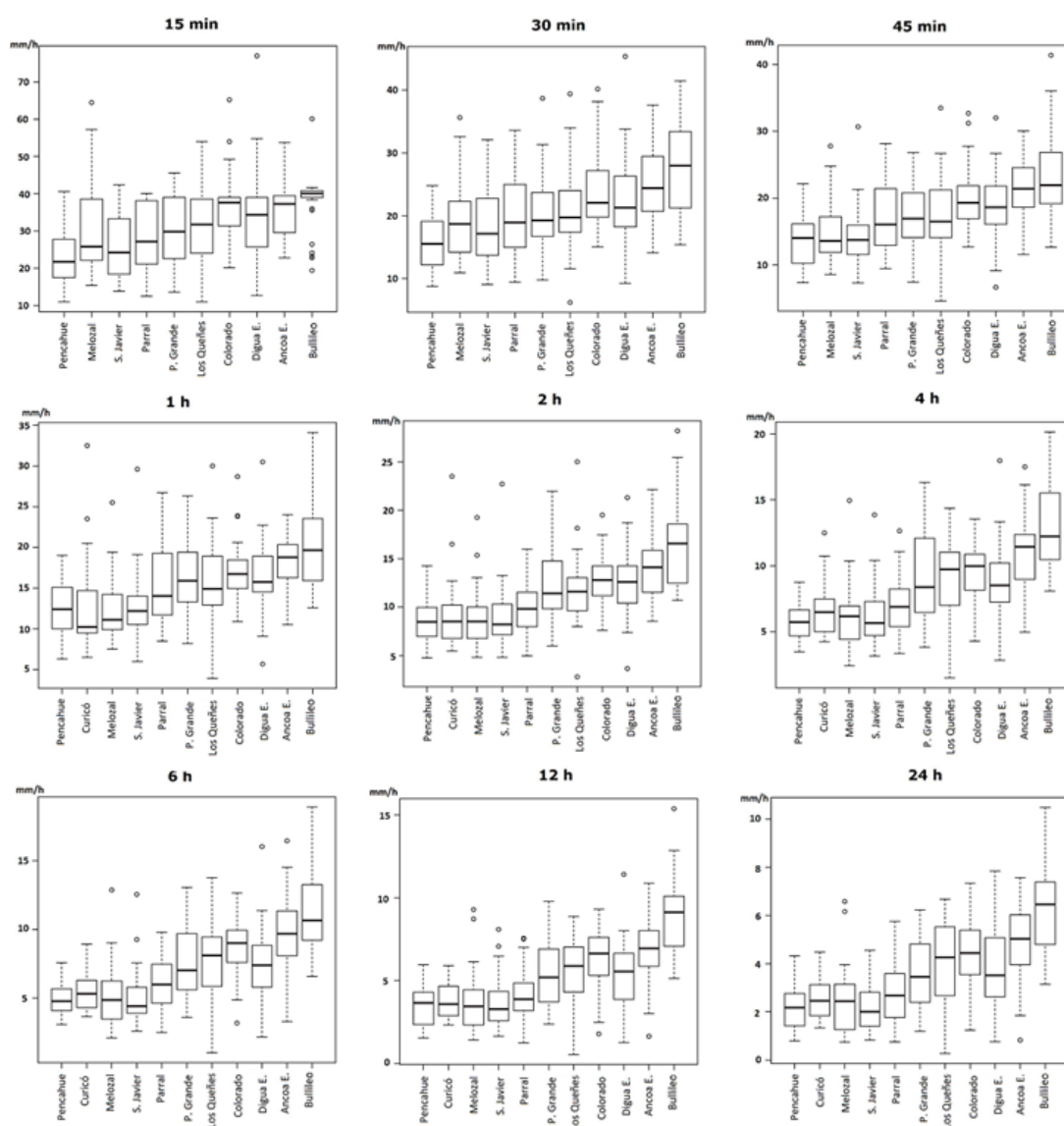


Figure 7. Boxplot graphs for the average annual maximum intensity for durations of 15, 30, and 45 minutes, and for 1, 2, 4, 6, 12, and 24 hours, between 1974 and 2009 for pluviographic stations sorted by annual precipitation from smallest to greatest

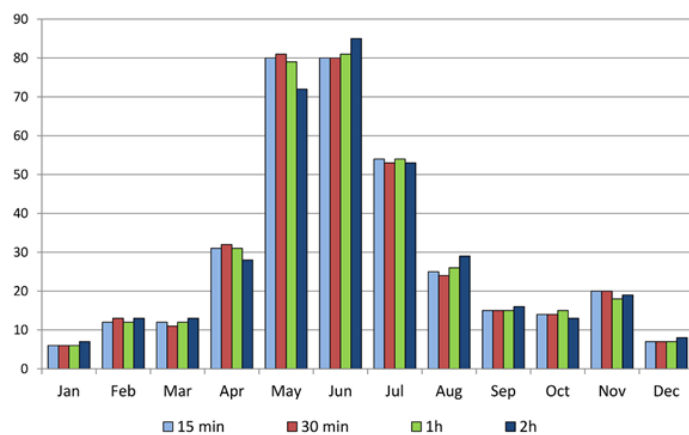


Figure 8. Frequency of occurrence for maximum annual intensities at all stations, under different durations

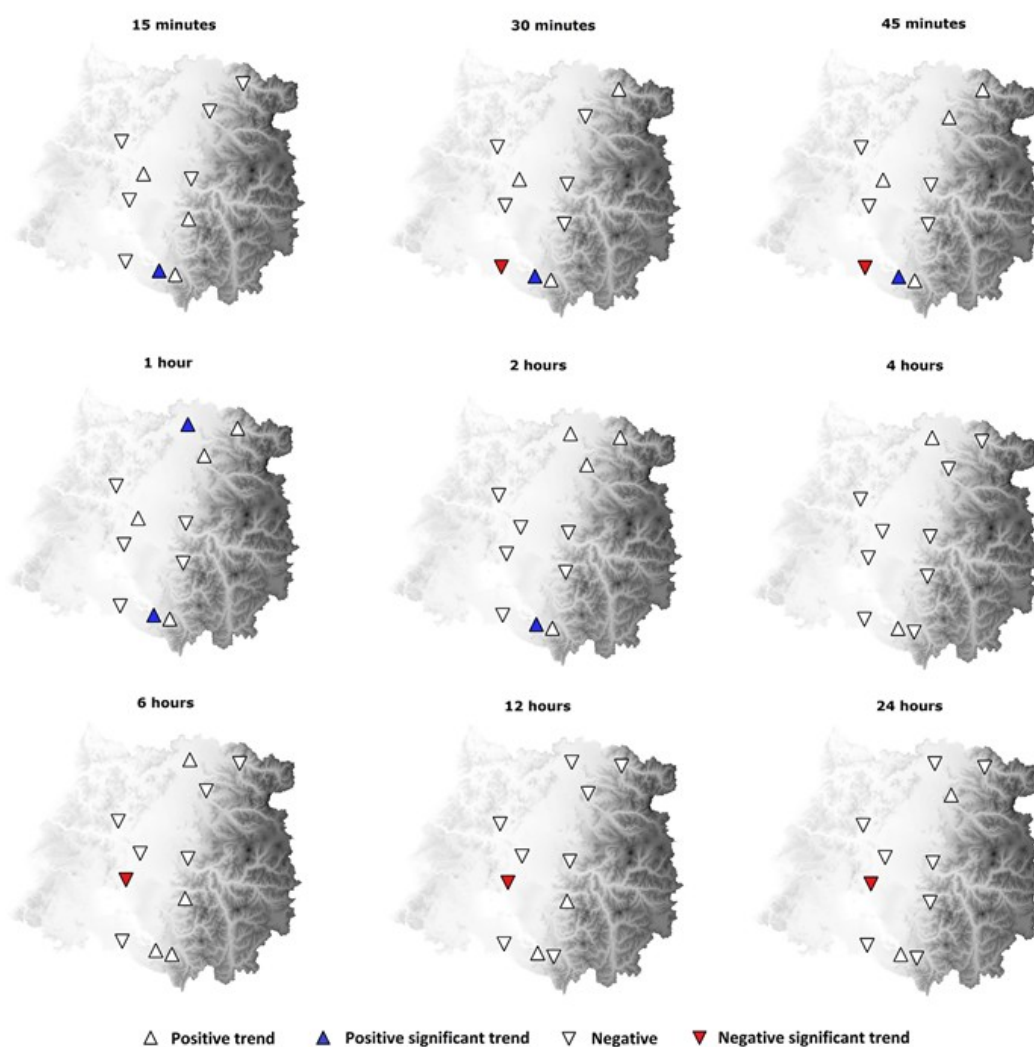


Figure 9. Trend map (Mann-Kendall) of maximum rainfall intensities for 15-, 30-, and 45-minute, and 1-, 2-, 4-, 6-, 12-, and 24-hour durations



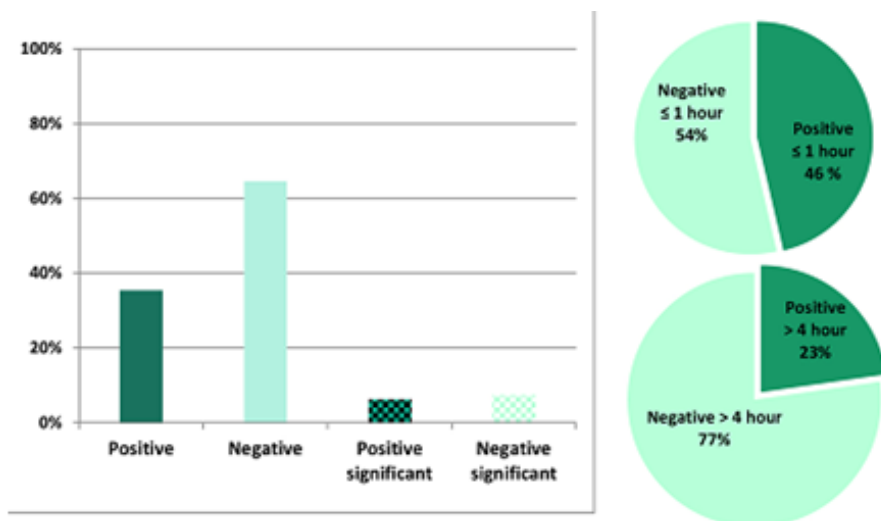


Figure 10. Trend values for the entire data set analyzed, as percentages

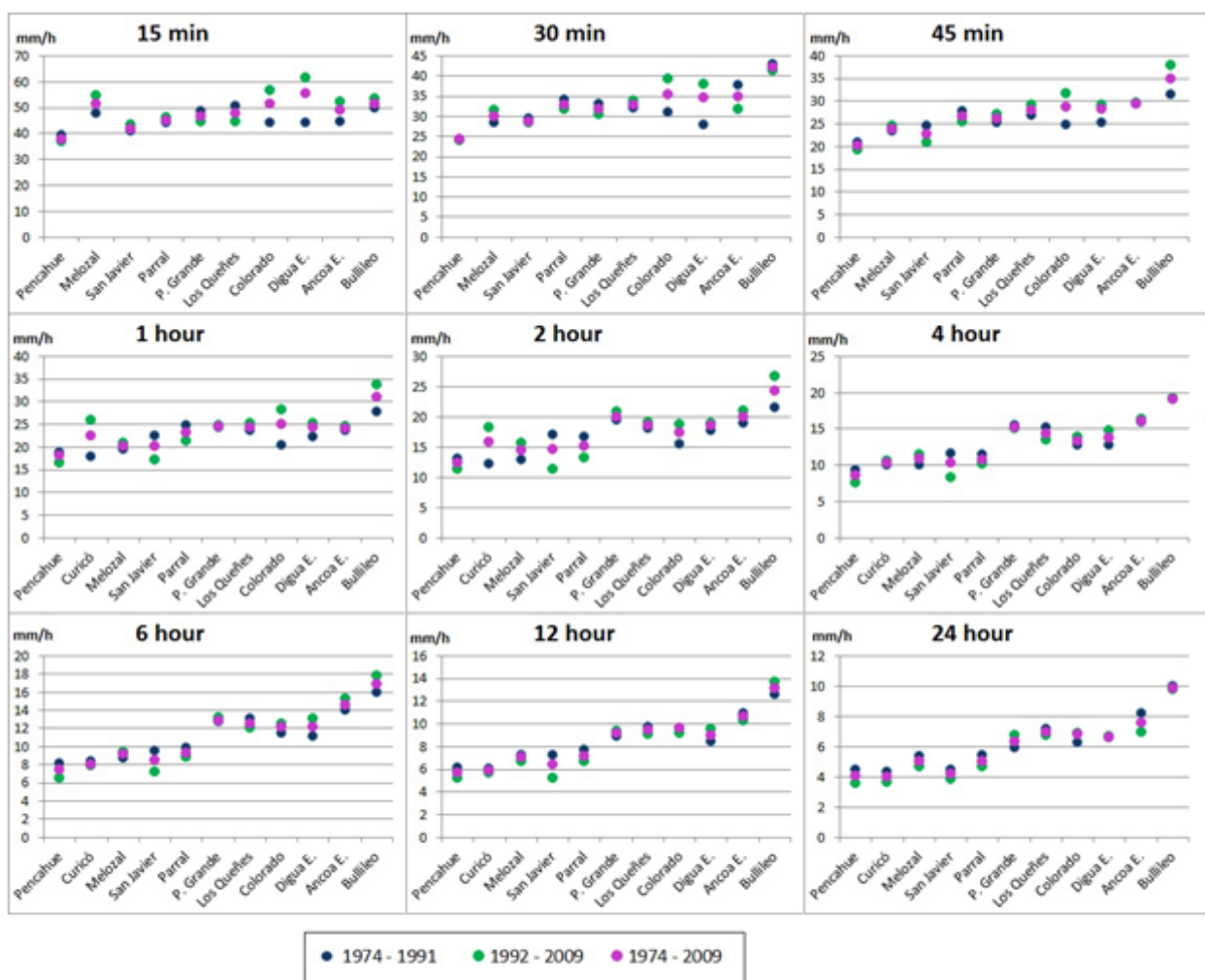


Figure 11. Comparison of annual maximum rainfall intensities for a 20-year return period, applied to the three timeframes (1974-1991, 1992-2009, and 1974-2009), considering each duration and station.

The above results suggest that annual maximum rainfall intensities from the 11 analyzed stations have not changed significantly (positive or negative trends). Similarly, the analysis under different time periods (obtained from the fitted Gumbel function) showed no differences among the three groups (1974-1991, 1992-2009, and 1974-2009), with the exception of a few stations (Colorado and Digua Embalse) (Figure 11).

It is not possible to unravel the reasons why there is a high differential on annual maximum rainfall intensities between both time periods, based on our current database. However, one explanation could be the geographical location of the stations (near bodies of water), as suggested by Pizarro *et al.* (2013).

Such differential is only expressed in durations equal or shorter than one hour, an indication of the need for further analysis, with more information, to be able to find more results. It is suggested to explore synoptic patterns for rainfall and other relevant climatological fields.

#### **4. CONCLUSIONS**

A relevant number of annual maximum rainfall intensities in the Maule region showed largely non-significant, negative trends. For intensities of less than one hour, there was no clear tendency through time or space; however, for intensities longer than four hours, most stations showed a tendency to

decrease over time, though such tendencies weren't statistically significant. This means that, considering the period analyzed, it is not possible to infer changes in temporal behavior patterns for annual maximum rainfall intensities.

Finally, the trend analysis showed that, for the 11 stations and different durations studied, the intensities between 1974 and 2009 did not display patterns of spatial or temporal behavior. The results instead show that the intensities have stayed within known ranges and have not shown any significant changes. However, it is advisable to expand the work performed in this study to other latitudinal areas of the country, in order to add more information to the data used in this study, which could then be used to either confirm or rule out the existence of significant changes to behavioral patterns of annual maximum rainfall intensities.

#### **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors of this study sincerely thank the Technological Center of Environmental Hydrology (University of Talca) and the Faculty of Agricultural Engineering's Department of Water Resources (University of Concepción). This study was funded by project CONICYT/FONDAP-15130015 and FONDECYT 1160656. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

#### **REFERENCIAS**

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology*, 6, 661-675. DOI:10.1002/joc.3370060607.
- Barrett, B., Garreaud, R., & Falvey, M. (2009). Effect of the Andes Cordillera on Precipitation from a Midlatitude Cold Front. *Monthly Weather Review*, 137, 3092-3109.
- Bartolini, G., Grifoni, D., Magno, R., Torrigiana, T., & Gozzinia, B. (2017). Changes in temporal distribution of precipitation in a Mediterranean area (Tuscany, Italy) 1955-2013. *International Journal of Climatology*, 38, 1366-1374. DOI: 10.1002/joc.5251
- Beck, F., Bárdossy, A., Seidel, J., Müller, T., Sanchis, E., & Hauser, A. (2015). Statistical analysis of sub-daily precipitation extremes in Singapore. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 337-358. DOI: 10.1016/j.ejrh.2015.02.001
- 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 century. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 933-948. DOI: 10.1623/hysj.2005.50.6.933

- Dhakai, N., & Tharu B. (2018). Spatio-temporal trends in daily precipitation extremes and their connection with North Atlantic tropical cyclones for the southeastern United States. *International Journal of Climatology*, 38, 3822-3831. DOI: 10.1002/joc.5535
- Deidda, R., Mascaro, G., Piga, E., & Querzoli, G. (2007). An automatic system for rainfall signal recognition from tipping bucket gage strip charts. *Journal of Hydrology*, 333, 400-412. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.011
- DMC (Dirección Meteorológica de Chile). (2001). *Climatología Regional* (2001).
- Fowler, A., & Hennessy, K. (1995). Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. *Natural Hazards*, 11, 283-303. DOI: 10.1007/BF00613411.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281, 180-195. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032
- Garreaud, R. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3-11.
- Gong, D., & Wang, S. (2000). Severe summer rainfall in China associated with enhanced global warming. *Climate Research*, 16, 51-59. DOI: 10.3354/cr016051
- González, A. (2016). Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del siglo XIX. *Revista Geografía del Norte Grande*, 64, 21-32.
- IPCC, (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J van der Linden and C.E Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jacques-Coper, M., & Garreaud, R. (2015). Characterization of the 1970s climate shift in South America. *International Journal of Climatology*, 35, 2164-2179. DOI: 10.1002/joc.4120.
- Jaklič, A., Šajn, L., Derganc, D., & Peer, P. (2016). Automatic digitization of pluviograph strip charts. *Meteorological Applications*, 23, 57-64, DOI: 10.1002/met.1522
- Montecinos, A., Kurgansky, M., Muñoz, C., & Takahashi, K. (2011). Non-ENSO interannual rainfall variability in central Chile during austral winter. *Theoretical and Applied Climatology*, 106, 557-568.
- Oliver, J. (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *The Professional Geographer*, 32, 300-309. DOI: 10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x
- Ortlieb, L. (1994). Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. *Revista Chilena de Historia Natural*, 67, 463-485.
- Pizarro, R., Cornejo, F., González, C., Macaya, K., & Morales, C. (2008). Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones en la zona central de Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23, 91-109.
- Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdes, R., Dominguez, F., Hossain, F., Ffolliott, P., Olivares, C., Morales C., Balocchi, F., & Bro, P. (2013). Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity. *Journal of Hydrology*, 481, 56-63. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.012
- 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.
- Sangüesa, C., Pizarro, R., Ibañez, A., Pino, J., Rivera, D., García-Chevesich, P., & Ingram, B. (2018). Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI. *Water*, 10, 112. DOI:10.3390/w10020112.
- Singh, D., Tsiang, M., Rajaratnam, B., & Diffenbaugh, N. (2013). Precipitation extremes over the continental United States in a transient, high-resolution, ensemble climate model experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 7063-7086.
- UNESCO. 2007. *Curvas Intensidad- Duración – Frecuencia, para la zona centro sur de Chile*, ed. Publisher: PHI-LAC, Uruguay. ISBN: 92-9089-100-9

- UNESCO. 2012. Documento País “Análisis de Riesgos de Desastres en Chile 2012”. VII Plan de Acción Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil (DIPECHO) en Sudamérica 2011–2012. Available online: <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Santiago/pdf/Analisis-de-riesgos-de-desastres-en-Chile.pdf> (September 2021).
- UNESCO. 2013. Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas, ed. Publisher: PHI-LAC, Uruguay. ISBN: 978-92-9089-189-5
- Valdés-Pineda, R., Valdés, J., Diaz, H., Pizarro, R., 2013. Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 36, 2979-3001. DOI: 10.1002/joc.4532
- Vasiljevic, B., McBean, E., & Gharabaghi, B. (2012). Trends in rainfall intensity for stormwater designs in Ontario. *Journal of Water & Climate Change*, 3, 1-10. DOI: 10.2166/wcc.2012.125
- Westra, S., Fowler, H., Evans, J., Alexander, L., Berg, P., Johnson, F., ...&Lenderink, G., Roberts, N. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52, 522-555. DOI:10.1002/2014RG000464
- Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman’s rho test for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259, 254-271. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7
- Zubieta, R., & Saavedra, M. (2009). Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes centrales peruanos: Valle del río Mantaro. *Tecnia*, 19, 13-22.

*Como citar este artículo:*

Sangüesa, C. *et al.*, (2021). Spatial and temporal behavior of annual maximum sub-hourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 143-156. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-10



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