



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

• Programa  
Hidrológico  
Internacional

# Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

2

VOL. 11  
SEPTIEMBRE 2019

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



Publicado en el 2019 por el Programa Hidrológico Internacional (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 2019 by the International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*

ISSN 1688-2881

© UNESCO septiembre 2019

Fotografía de portada: © Alfonso Gutiérrez

Lugar: Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, Chile.

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

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

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

---

---

**CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS**

**MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO**

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

**BLANCA JIMÉNEZ**

Comisión Nacional del Agua, Conagua, México

**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**

Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, CTHA  
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**

Universidad Libre; Pereira, Risaralda, Colombia

**Waldo Lavado-Casimiro**

Facultad de Meteorología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

**Henrique Marinho Leite Chaves**

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

**Manuel Fernando Luna Lemus**

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

**Ninell Janett Dedios Mimbela**

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, Perú

**Poliopro Fortunato Martínez Austria**

Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería, México

**Lilian del Castillo Laborde**

Facultad de Derecho de la Universidad de Buenos Aires, Argentina

**Mauro Nalesso**

Water & Sanitation Division Inter-American Development Bank, USA

**Evens Emmanuel**

Université Quisqueya, Haití

**Marta del Carmen Paris**

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

**Pablo A. Garcia-Chevesich**

University of Arizona, USA

**Jorge Víctor Pilar**

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

**Fernanda Julia Gaspari**

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

**Diego Alejandro Pérez Giraldo**

Universidad Libre de Colombia

**Hugo G. Hidalgo**

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

**Mauricio Pinto**

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

**Lili Ilieva**

Senior Analyst, ECo Ltd.

**Denilson Teixeira**

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

---

---

**STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF**

**M. Alfonso Gutiérrez López**

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

**Miguel Doria**

Editor Ejecutivo / *Executive Editor*  
Editor Asociado Inglés

**José Alejandro 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

**Clara Cremona y Sabrina Cupeiro**

Asistentes de Edición

**Ivonne Monserrat Cruz Paz**

Asistente de Indexación

**Jacqueline Gómez Martínez**

Asistente de Arbitraje

**Marcela Salas Salazar**

Asistente de herramienta OJS

---

---

## EDITORIAL

La urbanización en el mundo se está incrementando a un ritmo sin precedentes, especialmente en los países en desarrollo. Hacer frente a la magnitud y ritmo de este crecimiento implica prestar atención a distintos desafíos para lograr ciudades más inclusivas, resilientes y sostenibles.

Uno de tales desafíos, que contribuye en gran medida en el logro de mejores ciudades, es el adecuado manejo de los recursos hídricos. Las demandas en muchas ciudades han sobrepasado ya las fuentes de suministro de agua locales, tanto superficiales como subterráneas, teniéndose por resultado su explotación insostenible o incluso su agotamiento, con los consecuentes efectos negativos en el ambiente. La contaminación del agua por su parte se ha convertido en uno de los problemas más críticos para las ciudades a nivel mundial, teniendo un impacto directo sobre la salud humana y en la sostenibilidad de los ecosistemas. Los centros urbanos son vistos como lugares de esperanza para acceder a una vida más próspera. El desarrollo territorial demanda una planificación urbana que promueva el crecimiento equitativo, y por tanto, la generación de servicios sostenibles para una población urbana en aumento resulta ser un gran desafío.

En la actualidad siguen existiendo tareas pendientes para el logro de dicho objetivo, y si a ellas sumamos los nuevos retos propios del cambio climático, la tarea se visualiza mucho más compleja. Este fenómeno se presenta como una amenaza clara y preocupante para el desarrollo de América Latina y el Caribe; una amenaza en cuya gestación la región ha tenido poco o nada que ver, pero la que debe ser enfrentada tanto en la mitigación como en la adaptación. Los costos económicos, sociales y políticos convierten al cambio climático en uno de los ámbitos de acción más importantes para los tomadores de decisión, quienes deben proponer alternativas para el desarrollo de ciudades resilientes capaces de soportar los eventos climáticos que puedan afectarlas.

Por otra parte, las sequías están causando estragos en varias partes del mundo. En muchos lugares de la región se vislumbran sequías más prolongadas y más recurrentes, las que causarán problemas no solo de abastecimiento de agua para el consumo humano, sino también en el desarrollo de la agricultura y la producción de alimentos para los centros urbanos. A la problemática de los extremos hidrometeorológicos y su efecto sobre las ciudades, se agregan otras no menos severas, como lo son los problemas de saneamiento, contaminación, calidad del recurso, gobernanza y gestión integrada del ciclo urbano. El estudio y la colaboración en torno a estas temáticas hídricas es el principal argumento para presentar este número de nuestra revista.

En este número presentamos un total de diez artículos; seis trabajos están enfocados a las aguas urbanas en donde se trata desde el tema de ciudades resilientes, sistemas de drenaje sostenible y la evaluación del deterioro de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial. Se ponen a consideración un par de propuestas metodológicas para el diseño y la evaluación de índices de riesgo en servicios públicos. También tenemos el gusto de publicar nuestro primer artículo en portugués bajo el tema de reúso del agua. Una reseña de campo sobre cómo resolver los problemas de inundaciones complementa estos temas relacionados con el quehacer del Grupo de Aguas Urbanas. Asimismo, se presenta un artículo que analiza un índice de sequías empleando escurrimientos naturales. Un análisis de los caudales en el río Paraná nos permite estimar los eventos críticos de diseño para futuras obras hidráulicas. Un análisis de la dinámica de la contribución glaciar en la cuenca alta del río Yeso, completa este número.

Esperamos que esta compilación de artículos científicos, notas técnicas y reseña de campo, fortalezca la estrategia regional de acción basada en el conocimiento científico, técnico y el intercambio de información y experiencias.

**Carlos Berroeta Bustos**  
Coordinador Regional del Grupo de Trabajo Aguas Urbanas  
Programa Hidrológico Internacional PHI-UNESCO

---

---

## CONTENIDO / CONTENTS

Ciudades resilientes en LAC: aportes desde la gestión de las aguas urbanas en Uruguay <i>Resilient cities in LAC: Uruguayan contributions for urban water management</i> .....	1
Adriana Piperno, Santiago Benenati, Cecilia Emanuelli, Alejandra Cuadrado, Juan Martínez, Paula García, Daniel Alonso.	[ Artículo de investigación ]
Análisis del índice de sequía en caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma <i>Analysis of hydrological drought index (SDI) using natural runoff in the mexican watershed of the river Lerma</i> .....	17
Ulises Salvador Díaz Barriga Arroyo, Raúl López Corzo, Teresa Lluviaria Ortiz Aguilar, Irving Torres Miranda, Enrique Galván Vargas.	[ Artículo de investigación ]
Avaliação do potencial de produção e de usuários de água de reúso em Maceió, Alagoas, Brasil <i>Evaluations of water reuse utilization and identification of potential users in Maceió City, Alagoas State, Brazil</i> .....	29
Álvaro José Menezes da Costa, Callado, N.	[ Nota Técnica ]
Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible como herramienta para resolver problemas de inundaciones urbanas. Experiencias en Costa Esmeralda <i>Best Management Practices as a tool to solve urban flood problems. Experiences in Costa Esmeralda</i> .....	39
Gustavo Ariel Villalba, Fernando Aldo Curto, Nicolás José Malegni, Aquiles Fabián Linfante.	[ Reseña de campo ]
Verificación de la estabilidad estadística de la serie de caudales del río Paraná en la sección Corrientes <i>Verification of the statistical stability of the Paraná river flow series in the Corrientes section</i> .....	50
Marcelo Gómez, Jorge Pilar, Alejandro Ruberto, Carlos Depettris, Guillermo Méndez.	[ Artículo de investigación ]
Dinámica de la contribución glaciar a la cuenca alta del río Yeso durante el periodo de ablación 2017/2018 <i>Dynamics of the glacial contribution to the upper Yeso river basin during the period of ablation 2017/2018</i> .....	59
Diana Quevedo-Tejada, Edson Landeros, Diego Olivares, James McPhee, Alexis Caro, Carlos Berroeta, Carlos Poblete, Jorge Reyes, Harry Fleege, Javier Carvallo, José Luis Fuentes.	[ Artículo de investigación ]

---

---

Planteamiento del problema y propuesta de soluciones para abordar el desafío de la gestión de las aguas lluvias en el área metropolitana de San Salvador (AMSS), El Salvador <i>Problem statement and solution proposal to address the challenge of storm water management in the metropolitan area of San Salvador (AMSS), El Salvador</i> .....	71
Pablo Gómez Blanco, Luis Fernández Martínez, Enrique Manuel Flores, Oscar Eduardo Hernández. [ Artículo de investigación ]	
Metodología para el diseño de sistemas de drenaje sanitario y pluvial <i>Methodology for the design of sanitary and storm drainage systems</i> .....	85
Manuel M. Cabrera Delgadillo, Guadalupe Sánchez Campos, Juan Carlos Mejía Suárez, Carmen Hernández Pastor. [ Nota Técnica ]	
Propuesta metodológica y elaboración de índices de riesgo de servicios públicos en un barrio popular de la ciudad de Buenos Aires <i>Methodological proposal for public services risk indices in an informal neighborhood in Buenos Aires city</i> .....	97
María Eva Koutsovitits, Matías Goyeneche. [ Nota Técnica ]	
Evaluación del deterioro de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial <i>Evaluation of the degradation of sanitary and storm drainage systems</i> .....	111
Manuel M. Cabrera Delgadillo, Guadalupe Sánchez Campos, Juan Carlos Mejía Suárez, Carmen Hernández Pastor. [ Nota Técnica ]	

---

## Ciudades resilientes en LAC: aportes desde la gestión de las aguas urbanas en Uruguay

*Resilient cities in LAC: Uruguayan contributions for urban water management*

Adriana Piperno<sup>1\*</sup>, Santiago Benenati<sup>1</sup>, Cecilia Emanuelli<sup>1</sup>, Alejandra Cuadrado<sup>1</sup>  
Juan Pablo Martínez<sup>1</sup>, Paula García<sup>1</sup>, Daniel Alonso<sup>1</sup>

Recibido: 18/07/2019

Aceptado: 03/08/2019

\*Autor de correspondencia



### Resumen

Uruguay, al igual que el resto de los países de la región, está transitando hacia un cambio en la forma de comprender y actuar en las ciudades en relación con la gestión de aguas urbanas. El objetivo es tender a sistemas urbanos resilientes capaces de evaluar, planear y actuar para responder a todo tipo de obstáculos, ya sean repentinos o lentos, esperados o inesperados. En esta transición, las acciones en relación con las aguas urbanas son un motor de cambio ineludible. Se propone evidenciar la relevancia de las modalidades de planificación y gestión que apuntan a la resiliencia y logran adaptarse a entornos inestables, cambiantes, a partir de instituciones reflexivas, que aprenden de su propia práctica y se mantienen interconectadas. Se reflexiona en torno al proceso de desarrollo y aplicación de un conjunto de herramientas implementadas para la gestión de las aguas urbanas en los últimos diez años, haciendo énfasis en aquellas relacionadas a inundaciones urbanas y drenaje pluvial. La estrategia metodológica se basa en la triangulación de fuentes diversas, en particular, el análisis de dos relevamientos realizados en el año 2008 y 2018 y de productos generados en estos 10 años. La principal conclusión muestra importantes cambios hacia modelos más sostenibles y resilientes, aunque siguen existiendo fuertes desigualdades en las capacidades locales y en las acciones realizadas en las distintas regiones del país. Esto permite afirmar que el país está transitando hacia un cambio de modelo.

**Palabras clave:** resiliencia urbana, gestión de aguas urbanas, articulación institucional.

### Abstract

*Uruguay, like other countries in the region, is moving towards a different way of understanding and operating in its cities regarding urban water management. The aim is to obtain resilient urban systems, capable of evaluating, planning and acting in response to all kinds of obstacles, may they be sudden or slow, expected or unexpected. In this transition, urban water related actions are an essential engine of change. The article proposes to show the relevance of planning and management strategies that try to achieve resilience and are capable of adapting to unstable, changing environments based on reflective institutions that learn from their own practice and remain connected. It reflects on the process of development and implementation of a set of tools for urban water management in the last ten years, emphasizing those related to urban floods and storm drainage. The methodological strategy is based on the triangulation of several sources; particularly it draws from two surveys made during 2008 and 2018 and the products developed in those ten years. The main conclusion is that important changes towards a more sustainable and resilient model are observed, albeit strong inequalities regarding local capabilities and actions in different regions of the country are still present. In this sense, the article states that the country is currently moving towards a change of model.*

**Keywords:** urban resilience, urban water management, institutional articulation.

1 Dirección Nacional de Aguas de Uruguay. [apiperno@montevideo.com.uy](mailto:apiperno@montevideo.com.uy), [sa.benenati@gmail.com](mailto:sa.benenati@gmail.com), [cemanuelli@gmail.com](mailto:cemanuelli@gmail.com), [alejacuadrado@gmail.com](mailto:alejacuadrado@gmail.com), [juanmartinezpenades@gmail.com](mailto:juanmartinezpenades@gmail.com), [pgarciaiturralde@gmail.com](mailto:pgarciaiturralde@gmail.com), [alonsoreigia@gmail.com](mailto:alonsoreigia@gmail.com)

## 1. INTRODUCCIÓN

El artículo tiene por objetivo reflexionar sobre el proceso de transición de Uruguay hacia un modelo de planificación-gestión de las aguas urbanas más sostenible y resiliente, entendiéndose que el intercambio de buenas prácticas, errores y aprendizajes es un aporte relevante en la construcción del desarrollo científico colaborativo de la región en materia de gestión de las aguas urbanas. Se pretende aportar a la evaluación de la brecha entre el conocimiento científico disponible y la práctica transformadora en las ciudades, a partir del análisis de las dificultades y fortalezas detectadas en los procesos de aplicación de dicho conocimiento. Con esta finalidad, se analizan y sistematizan las acciones realizadas desde la creación del área de Inundaciones y Drenaje Urbano de la DINAGUA hasta la fecha, con la intención de revisarlas, compartir avances y dificultades. Se presenta, a modo de contexto, una reseña del contexto regulatorio e institucional del país y un breve recorrido por la construcción histórica de modalidades de actuación en la gestión de las aguas urbanas. El desarrollo del trabajo describe y reflexiona sobre las acciones desarrolladas y los productos obtenidos durante el proceso.

### 1.1 Aguas urbanas y ciudades resilientes

A lo largo de la historia el agua ha tenido un rol central en la sociedad y su gestión ha estado estrechamente asociada con el paradigma predominante de cada época. La mayoría de los centros urbanos del país se encuentran cercanos a cursos de agua, ya que estos proporcionan agua para consumo y conectividad a través de la navegación (Piperno, 2009). Con el paso del tiempo, los procesos de densificación y crecimiento de las ciudades modificaron las cuencas de aporte, el área superficial disponible para las crecidas, la calidad de agua y la biota de los ecosistemas acuáticos.

Los cambios culturales y los avances científicos influyeron en la forma de entender y gestionar las aguas urbanas. El desarrollo industrial amplificó los problemas de salubridad ya existentes en las ciudades, por lo que, durante gran parte del siglo XX, bajo un enfoque higienista, los científicos y gestores focalizaron

los recursos en alejar a los ciudadanos de las fuentes de contaminación. Esta perspectiva se caracterizó por la conducción lo más rápido posible de las aguas urbanas hacia afuera de la ciudad con la intención de mitigar problemas de salubridad, ocultando muchos de los cursos de agua existentes. Posteriormente, se registra un cambio caracterizado por el tratamiento de las aguas residuales domésticas, amortiguación y el control del impacto sobre la cantidad de las aguas pluviales (Piperno, 2015).

En la actualidad, existen estudios que dan cuenta de las debilidades de promover soluciones sectoriales (Allen, 2019) así como de las dificultades reales en cubrir la brecha en infraestructura urbana desde esta modalidad de actuación, brecha que se amplía aún más si se toman en consideración los escenarios de cambio climático. Sumado a esto, desde otros ámbitos, se ve con preocupación la pérdida de la calidad ambiental por la tradicional forma de generar ciudad (Alberti y Marzluff, 2004). La gestión eficiente del agua requiere una perspectiva integral que considere sus diversos usos en conjunto y sus interdependencias, las actividades en el territorio que impactan sobre el recurso hídrico y los distintos actores involucrados en su gobernanza. Se acciona sobre un problema complejo que, lejos de resolverse por la imposición de una solución del gobierno central, debe surgir del acuerdo y reconocimiento de un proceso de co-producción de múltiples actores; diferentes niveles de gobierno, proveedores de servicios estatales, organismos públicos y habitantes. Cambios acelerados y futuros inciertos pautan los nuevos escenarios de actuación donde miradas integrales se presentan como la única forma de resolver los problemas.

Las perspectivas integrales valorizan el ecosistema natural y el agua como recurso. Desde la mirada ecosistémica y social cobra relevancia el concepto de resiliencia urbana, definida por el quinto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), como la “capacidad de un sistema socioecológico de afrontar un suceso o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantenga su función esencial, su identidad y su estructura, y conservando al mismo tiempo la capacidad de

adaptación, aprendizaje y transformación” (IPCC, 2014b).

La adopción del nuevo paradigma implica no solo la incorporación de nuevas tecnologías y dispositivos infraestructurales sino, fundamentalmente, la incorporación de otras formas de entender y de actuar y, por lo tanto, requiere cambios en la gestión. Numerosa bibliografía (ONU-HABITAT, 2016; Hauge, 2015) refiere a una serie de principios complementarios para el desarrollo de modalidades de gestión que contribuyen a la construcción de entornos urbanos resilientes. Se pone en valor la gestión de la conectividad entre los actores, así como la ampliación de su participación, en el entendido de que un alto nivel de articulación entre los elementos de la red involucrados en la gestión contribuye a una recuperación más eficaz frente a perturbaciones y permite acciones complementarias y sinérgicas aun cuando alguno sea más frágil. Otro aspecto a destacar es la promoción de instancias de aprendizaje que incorporen el pensamiento adaptativo y complejo (Hauge, 2015).

Los cambios culturales para la comprensión de las aguas urbanas tienen su correlato en aquellos asociados a temas de desastres y catástrofes. En estos temas surge un nuevo paradigma que sustituye al vigente en el siglo XX donde los aspectos físicos de la naturaleza estaban en el centro de atención. Durante la década de los 80, asociado a temas de desarrollo y pobreza en América Latina, comienza a darse profusas discusiones sobre los desastres y riesgos, motivados además por la declaración del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales-DIRDN realizada por la Organización de Naciones Unidas (ONU) en 1989 (Natenzon y Ríos, 2015; Narváez *et al.*, 2009).

En la actualidad hay consenso en que el riesgo es la interacción entre la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición. Así queda planteado en el quinto informe del IPCC donde se presenta al riesgo como la combinación de los efectos de una amenaza, que mediada por las respectivas condiciones de exposición, produce sobre determinado sistema en función de su vulnerabilidad (IPCC, 2014a). En la Gestión del Riesgo de Desastres la resiliencia está

condicionada a la capacidad de una sociedad para organizarse. Gestionar el riesgo implica la formulación de políticas y estrategias con el fin prevenir nuevos riesgos de desastres, reducir los existentes y gestionar el riesgo residual, contribuyendo a la resiliencia y a la reducción de las pérdidas (UNISDR, 2009).

En este sentido gestionar el riesgo, no necesariamente se reduce a la actuación física en el factor de la amenaza, sino que admite cambios y modificaciones en los otros factores que la componen. El riesgo es entendido como un proceso complejo, dinámico y controlable ya que es posible actuar sobre los otros componentes, para mitigarlo, reducirlo o adaptarse al mismo (Narváez *et al.*, 2009).

## 2. METODOLOGÍA

Este artículo se inscribe en el marco de la estrategia de intervención del equipo del área Inundaciones y Drenaje Urbano de la DINAGUA. Se presenta una síntesis de la sistematización y reflexión sobre las acciones emprendidas desde la creación del área de hasta la fecha, que permite revisarlas y compartir los avances. Es una reflexión sobre las prácticas dentro del proceso planificador que pone a disposición del lector datos cuantitativos y cualitativos que la sustenta.

Debido a la naturaleza compleja del tema y la participación de múltiples instituciones en la gestión y planificación de las aguas, dicha sistematización implicó la recolección y análisis de información diversa. Se trianguló información proveniente de: procesamiento de información secundaria (censos nacionales de población, vivienda, hogares y de entorno urbanístico, encuesta continua de hogares, catastro nacional, entre otros), sistematización y georreferenciación de información en archivos del MVOTMA e Intendencias Departamentales, estudios específicos (por ejemplo, estudios hidrológicos hidráulicos, estudios de población o sociales, estudios de medidas de adaptación), instancias de talleres realizadas con actores relevantes (técnicos de las intendencias y/o de la empresa responsable de los servicios de agua potable y alcantarillado) y recorridas de campo. En particular, se sustenta en dos relevamientos

nacionales y la evaluación de las acciones emprendidas entre 2008 y 2018. Se configura la línea base a partir de un primer relevamiento a nivel nacional sobre el estado de las aguas urbanas, realizado en el año 2008, y a partir de recopilación y sistematización de información antecedente dispersa hasta la fecha. Se realizaron entrevistas grupales en los 19 departamentos donde participaron los técnicos responsables de la gestión de las aguas a nivel de las ciudades (54 en total). Se utilizó una pauta de entrevista que fue acompañada de recorridos de campo bajo la guía de los técnicos locales y registro en planos papel y fotográfico. Esto permitió configurar un mapa de las problemáticas principales, las capacidades instaladas en los gobiernos locales, la percepción general sobre la forma de gestionar las aguas urbanas, entre otras. Los emergentes sentaron las bases para que DINAGUA organizara y planificara las líneas de trabajo en la materia. En el año 2018 se realizó un nuevo relevamiento con características similares al de 2008, del que participaron 187 técnicos en total, con la finalidad de analizar e identificar problemas de difícil resolución, conflictos emergentes y avances. La metodología de trabajo parte de entender que para lograr transformaciones profundas, es necesario generar cambios incrementales que permitan que el sistema se adapte a las nuevas circunstancias y construya nuevas estructuras alineadas con la nueva configuración. Debe ser, por lo tanto, reorientada a procesos equilibrando coherencia con incertidumbre y complejidad (Rotmans y Loorbach, 2009). En este sentido las instancias de seguimiento y evaluación de las prácticas son instancias esenciales para la implementación de modalidades alternativas de actuación. La sistematización, georreferenciación y aprovechamiento de estudios generados habilitan análisis longitudinales, seguimiento de procesos y evaluación continua.

### *2.1 Características del Uruguay, marco regulatorio e institucional*

La topografía de Uruguay se caracteriza por suaves relieves en donde se distribuye uniformemente una densa red de cursos de agua dentro de los que se registran ríos y lagunas transfronterizas. Su costa cuenta con una longitud de 670 km distribuidos entre el Río de

la Plata (450 km) y el océano Atlántico (220 km). La precipitación acumulada anual se incrementa de suroeste a noreste y varía entre 1,100 y 1,600 mm. Las precipitaciones mensuales no presentan una estacionalidad marcada y uniforme en el territorio. En términos interanuales el régimen de precipitaciones se caracteriza por una distribución altamente variable, con alternancia de años secos y años con fuertes precipitaciones.

Según el último Censo Nacional, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el año 2011, la población del país asciende a 3,286,314 habitantes, localizándose el 95% en áreas urbanas. La distribución de la población en el territorio no es homogénea concentrándose más de la mitad al sur del país sobre la costa del Río de la Plata, específicamente en la capital, Montevideo, y en la zona metropolitana. El sistema de ciudades está compuesto por 421 localidades con menos de 5,000 habitantes, 54 con población entre 5,000 y 10,000 habitantes y por 20 compuestas por más de 30,000 habitantes. Particularmente, además de Montevideo solo una ciudad más supera los 100,000 habitantes. Cada uno de estos centros poblados posee características particulares asociadas con su localización y dimensión.

El Estado es unitario y descentralizado territorialmente en 19 departamentos, con sus respectivos gobiernos y administraciones departamentales, denominadas Intendencias, que corresponden al segundo nivel de gobierno. En 2010 se crea un tercer nivel de gobierno, los municipios, asociados centros poblados con más de 2,000 habitantes que en general no corresponden con capitales departamentales.

Uruguay, al igual que en otros países de la región, viene construyendo un marco normativo e institucional relacionado a las temáticas territoriales, ambientales y de aguas. La reforma de la Constitución en 2004, que ya declaraba a la protección del medio ambiente como de interés general, reconoce en el artículo al agua como recurso natural esencial para la vida, el acceso al agua potable y al saneamiento como derechos humanos fundamentales y sienta las bases para la Política Nacional de Aguas.

En este marco se promulga, por ejemplo, la ley de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible (Ley 18308, 2008), la ley de Política Nacional de Aguas (Ley 18610, 2009), la ley de Creación del Sistema Nacional de Emergencias (Ley 18621, 2009) y las Directrices Nacionales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible (Ley 19525, 2017).

Asimismo se elabora el Plan Nacional de Aguas (PNA) (Decreto N° 205/017, 2017), aprobado por el Poder Ejecutivo. Este documento técnico-político establece los lineamientos generales para la gestión integrada y sustentable del agua en todo el territorio nacional, propone objetivos específicos y líneas estratégicas de acción, a la vez que sienta las bases para la formulación de planes regionales y locales.

La gestión de los recursos hídricos implica la actuación de múltiples actores, cuyas competencias y responsabilidades están reguladas por leyes y decretos reglamentarios. Al Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) le corresponde la formulación, ejecución y supervisión de las políticas nacionales de medio ambiente, ordenamiento territorial, vivienda y aguas. A través de la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), se formulan las políticas en materia de aguas para “mejorar la calidad de vida de los habitantes del país asegurando el uso sustentable de los recursos hídricos, abogar por la gestión integrada de los recursos hídricos mediante acciones planificadas y participativas en coordinación con las restantes políticas públicas y trabajar en conjunto con los gobiernos departamentales y municipales para promover acciones coordinadas entre la gestión del territorio y la gestión del agua”. Hasta la creación de la DINAGUA en 2006 no existía, a nivel central, un organismo para establecer criterios nacionales en relación con las aguas urbanas, en particular asociados a inundaciones y drenaje urbano. Estos temas se resolvían en los niveles locales con criterios dispares. Se presenta, un nuevo escenario que exige un nuevo enfoque para las aguas urbanas, dado que las herramientas analíticas tradicionales y los métodos de resolución de problemas no producen el propósito previsto ni acorde a la realidad. Bajo tutela administrativa del Poder

Ejecutivo a través del MVOTMA, se encuentra la Administración de Obras Sanitarias del Estado (OSE) quien brinda el servicio de agua potable para todo el país y el servicio de saneamiento por alcantarillado para todo el país con excepción de Montevideo.

Los gobiernos departamentales tienen dentro de sus cometidos la elaboración y la aprobación de instrumentos de ordenamiento territorial en su ámbito de competencia, el contralor de la edificación y vivienda, higiene sanitaria y de salubridad y ejecutar obras públicas departamentales. En particular planifica y gestiona el uso y ocupación de las áreas inundables, el drenaje pluvial y los sistemas de saneamiento estático. Los municipios, por su lado, colaboran con el desarrollo de los cometidos departamentales dentro de los límites de su jurisdicción y elaboran programas de desarrollo y adopción de medidas de protección al ambiente (Ley N° 18567/2009). En 2009 se crea el Sistema Nacional de Emergencia (SINAE) a través de la Ley N° 18621, como un sistema público de carácter permanente, cuya finalidad es la protección, los bienes de significación y el ambiente, ante el acaecimiento eventual o real de situaciones de desastres (Artículo 1o), es un hecho fundamental en el contexto institucional para la gestión de riesgos. Asimismo en el artículo 17 de la citada ley convoca a todas las instituciones públicas responsables de formular y/o ejecutar planes de desarrollo, estratégicos, de ordenamiento territorial independientemente del ámbito de aplicación a introducir obligatoriamente procesos de planificación, de análisis y de zonificación de amenazas y riesgos.

### **3. RESULTADOS**

#### *3.1 Dimensionamiento de los problemas a escala nacional y departamental*

El dimensionamiento de los problemas permite visualizarlos, conocer cómo se distribuyen en el territorio y comunicarlos a los tomadores de decisión. Esto redundaría en la posibilidad de obtener presupuesto para acciones consistentes entre sí y planificadas a largo plazo. La cuantificación ayuda a establecer prioridades de acción y estrategias a nivel país y departamental.

En este sentido, se generan procesos sinérgicos entre la visualización de los conflictos, la mejora de la información, la capacitación, el fortalecimiento de equipos locales y la disponibilización de fondos.

A modo de ejemplo se presentan avances que aportan a la planificación y gestión de las aguas urbanas a nivel departamental y nacional:

- a. Del conocimiento asistemático de eventos históricos a protocolos de relevamiento y registro sistemático de eventos de inundación. El relevamiento de curvas reales de inundación asociadas al nivel máximo alcanzado por el agua en las localidades afectadas robustece los conocimientos sobre el comportamiento de los cursos de agua, permite evaluar las pérdidas y daños ocasionados y estimar el número de personas en la zona inundada. Al año 2008, 19 ciudades en todo el territorio nacional contaban con alguna curva real de inundación relevada, la mayoría disponibles en formato papel. Hoy se registran 46 localidades con al menos una curva real de inundación, digitalizadas e ingresadas en un sistema de información geográfica, facilitando su análisis, disponibilidad y transferencia. Se ha asumido, por parte de los diferentes actores, la relevancia de registrar los eventos de inundación. Como consecuencia de esto, en el marco del Sistema Nacional de Emergencia (SINAE), se elabora un protocolo de relevamiento dónde se determina, entre otras cosas, las competencias institucionales para la generación de curvas de inundación.
- b. Del evento de crecida como fotografía a la comprensión de las dinámicas. Se promueve la realización de estudios hidrológicos e hidráulicos como elemento para aumentar el conocimiento del funcionamiento del sistema, contar con delimitación de zonas afectadas ante eventos hidrometeorológicos de distinta recurrencia e identificar causas y soluciones posibles a problemas existentes, y realizar análisis prospectivos. En 2008 se registró la existencia de 7 estudios hidrológicos e hidráulicos enfocados en inundaciones, ninguno de los cuales era utilizado para la gestión. Actualmente, se cuenta con el registro de al menos 44 estudios hidrológicos

e hidráulicos (33 de cursos de agua principales de centros urbanos y 11 de cursos de agua secundarios). Este aumento vino asociado al fortalecimiento de los equipos técnicos locales para la interpretación y aplicabilidad de los resultados de dichos estudios. Como forma de aumentar las capacidades locales, desde la Dirección se promueve el asesoramiento para la construcción de términos de referencia y licitaciones y el acompañamiento a los técnicos departamentales en el ejercicio de contraparte.

- c. La identificación, dimensionamiento y visibilidad de problemas existentes pero desconocidos y de conflictos potenciales generados por pequeños cursos de agua. Como resultado del amanzanamiento tradicional de los centros urbanos sin considerar la presencia de pequeños cursos de agua, se generó un gran conflicto en todos los centros poblados del país: la existencia de predios urbanos atravesados por cañadas. Hecho que se profundiza cuando los propietarios, rellenan y construyen desconociendo el curso y/o con la intención de aprovechar al máximo la parcela. Estos son puntos susceptibles de padecer desbordes de la red pluvial y donde suele existir inundación de viviendas, resultando en uno de los principales problemas de drenaje pluvial en Uruguay. Detectado el problema, se procede a la identificación de predios urbanos atravesados por cañadas o cursos de agua lo cual se realiza a partir de imágenes satelitales e información topográfica. Los datos indican que existen en el entorno de 14,500 predios atravesados por cañadas (figura 1), donde residen aproximadamente 42,600 personas. La información mapeada e identificada con un listado de los padrones es aplicada en los procesos de planificación territorial de las ciudades, por ejemplo en los Planes Locales de Ordenamiento Territorial (PLOT), que son instrumentos definidos por la Ley 18308, o en proyectos urbanos de detalle.
- d. Dimensionamiento y caracterización de personas, viviendas y hogares expuestos a nivel nacional a inundaciones por desborde de ríos y arroyos. La profundización sobre los

componentes de vulnerabilidad y exposición es una línea de trabajo fundamental en la gestión de riesgos. Ante la necesidad de contar con el número de personas que residen en áreas inundables se realiza una primera estimación en base a la intersección de curvas de inundación con datos del censo nacional de población, vivienda y hogares de 2011. Se tomó como universo 49 ciudades, que concentra el 75% de la población total del país. La figura 1 presenta la cantidad de

personas asentadas en áreas inundables a nivel nacional. Hoy la estimación indica que más de 94,900 personas, 31,000 hogares y 34,000 viviendas se encuentran en zonas inundables. Esta cifra se va actualizando a medida que surge información más precisa. Esta cuantificación, aporta al sistema de indicadores del país para dar cuenta del cumplimiento de compromisos internacionales.

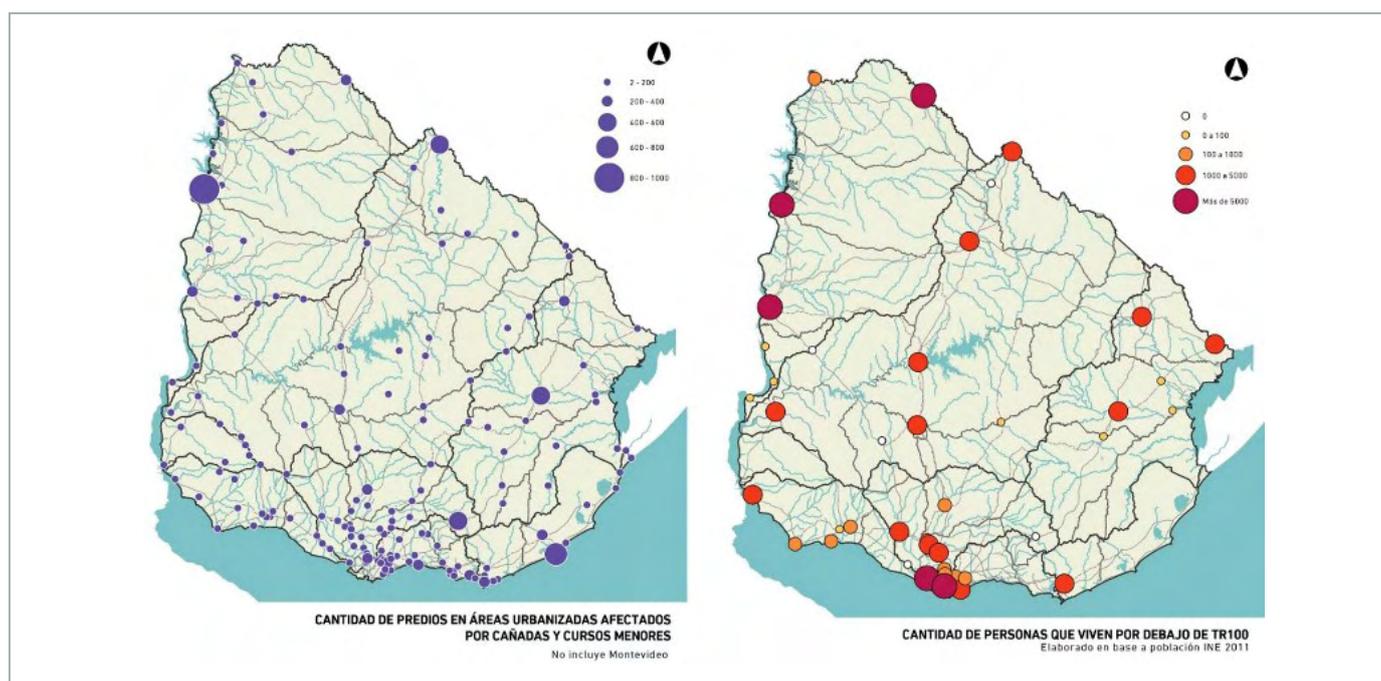


Figura 1. Cantidad de predios atravesados por cursos de agua en áreas urbanizadas (izquierda). Número de personas que habitan zonas inundables (derecha). (Fuente: elaboración propia)

- e. De información dispersa a la conformación de una base de datos geoespacial disponible para el trabajo en red. La información recopilada y generada es sistematizada e incorporada a una base de datos geoespacial con el fin de que su utilización habilite y retroalimente nuevo conocimiento y reflexión de procesos relativos a las aguas urbanas. Adicionalmente, la construcción de una base de datos geoespacial facilita y hace más eficiente los procesos de transferencia de información entre los distintos organismos así como con la sociedad civil y actores privados. En la medida en que esta información es visibilizada, se encuentra accesible para los técnicos locales y es aplicada, surgen nuevas demandas y la necesidad de mejorar la información existente.
- f. Incorporación del conocimiento técnico local. Se generan espacios de encuentro con técnicos de las instituciones involucradas en la planificación y gestión de las aguas en los departamentos con la finalidad de incentivar y dar continuidad al trabajo interinstitucional, principalmente entre el gobierno local y nacional. Esta modalidad de trabajo ha permitido identificar los principales problemas distribuidos en todo el país y el reconocimiento de otros a partir de la nueva información: predios atravesados por cursos de aguas, interacción entre los

subsistemas de drenaje pluvial y saneamiento, interacciones de los subsistemas de agua con el sector vivienda y las prácticas de los habitantes desconociendo el funcionamiento sistémico del agua en su ciudad. El estudio comparativo entre los relevamientos realizados en los años 2008 y 2018 ha permitido constatar que los equipos técnicos se han fortalecido de forma sostenida y generalmente los problemas identificados vienen acompañados de proyectos o acciones para su resolución. De todos modos, se observa en varios casos carencia

de especialistas, dificultades de diálogo entre técnicos y tomadores de decisión y problemas para implementar sistemas de control de cumplimiento de la normativa. A partir de la percepción de los técnicos locales entrevistados en los relevamientos antedichos, se sintetiza la gravedad de los problemas en cuatro subsistemas de aguas urbanas (aguas pluviales, aguas residuales, suministro de agua potable, aguas fluviales y costeras) para todas las localidades del país. Como ejemplo se presenta en la figura 2 dicha síntesis en relación al agua pluvial en el departamento de Colonia.

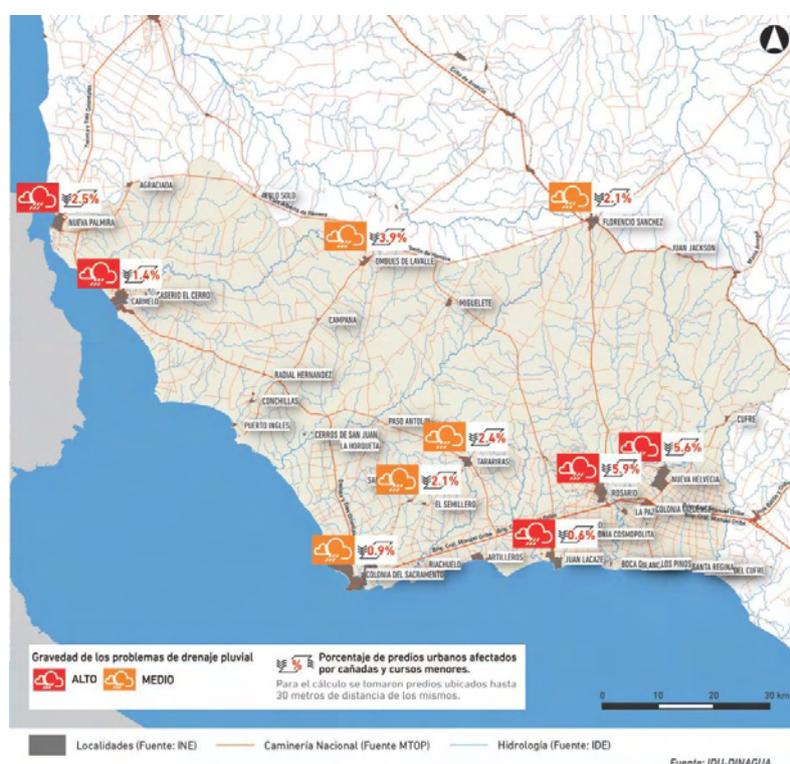


Figura 2: Gravedad de los problemas de drenaje pluvial en el departamento de Colonia. Fuente: elaboración propia.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1 Red de seguimiento y estrategias de evaluación de procesos.

En contextos de fuerte incertidumbre, como es el caso de la gestión de las aguas urbanas, es fundamental contar con un sistema de evaluación, que permita dar seguimiento, monitorear, detectar cambios, predecir acontecimientos y evaluar alternativas de acción. El gobierno nacional cuenta con mecanismos de seguimiento para verificar el cumplimiento tanto

de los objetivos de gestión como de los compromisos asumidos a nivel nacional e internacional. Este es el caso de los indicadores de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a través de los Informes Nacionales Voluntarios. En temas de agua se destacan los ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento, ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles (2018) y ODS 13 Acción por el clima (2019). Complementariamente, se ha llegado a un consenso sobre la necesidad de implementar un sistema coordinado de monitoreo y evaluación.

En este contexto, comienzan a conformarse redes interinstitucionales, muchas veces ad-hoc, que habilitan, por ejemplo: el desarrollo conjunto de una tarea específica, el intercambio de información, o la formalización de ámbitos para seguimiento y monitoreo. Estas redes, donde DINAGUA forma parte como un nodo, buscan gestionar su propia conectividad, en el entendido que la evaluación del sistema es eficiente si se da la articulación para la transferencia y análisis en conjunto de la información. El valor de la red está dado por el trabajo en conjunto que permite obtener y analizar información más allá de la producida por cada nodo independientemente. Reconocer el papel de cada elemento de la red permite focalizar y dirigir esfuerzos, ya que al robustecer cada uno individualmente se fortalece el conjunto. Son ejemplo de implementaciones de redes el SINAIE, el Sistema Nacional de Respuesta al Climático (SNRCC) y, dentro de este último, los procesos para la formulación de los Planes Nacionales de Adaptación en ciudades y costas. Particularmente, las redes de trabajo para el seguimiento y evaluación de los procesos tratan de salvar un problema preocupante como la disponibilidad y calidad de la información, consecuencia, muchas veces, de su estado incipiente de elaboración o por su carácter disperso y con escasos metadatos para entender su contexto y alcance.

#### *4.2 El sistema de planificación integral de las aguas*

a. Planificación nacional de las aguas. La planificación y gestión de las aguas urbanas forman parte de un sistema articulado. Independientemente del ámbito para el cual se planifiquen los recursos hídricos (nivel nacional, internacional en el caso de cuencas transfronterizas, regional o local); las líneas estratégicas y los programas deben ser consistentes y sentar las bases en los mismos principios. En este sentido se destaca el rol del PNA (2017) aprobado por decreto del Poder Ejecutivo (N 205/17). Este instrumento técnico-político se propone tres grandes objetivos: agua para el uso humano, agua para el desarrollo sustentable y la gestión de riesgos de eventos extremos, cambio y variabilidad climática. El Plan cuenta con cinco directrices estratégicas

transversales: 1. gestión integrada y sustentable, 2. participación de usuarios de la sociedad civil, 3. incorporación del concepto de riesgo en la planificación y la gestión, 4. investigación, innovación y generación de capacidades y 5. educación ambiental. El PNA es el resultado de un proceso de construcción comenzado en el año 2010 que involucró a actores relacionados con la gestión de las aguas: organismos estatales, academia, técnicos y sociedad civil. En él se recogen y articulan las acciones en desarrollo coherentes con los principios y la visión a futuro de los recursos hídricos. No solo establece directrices y programas, sino que se nutre de acciones y buenas prácticas presentes en diferentes ámbitos; brindando así un marco que otorga aval político y ciudadano y oportunidades de generar mayores sinergias entre las acciones. A modo de ejemplo, relacionado a la gestión de riesgos hidroclimáticos, el Plan incorpora a los mapas de riesgo en elaboración y a los planes de aguas urbanas, y los consolida en una línea de acción.

b. Planificación de las aguas urbanas. Muchos de los problemas vinculados a las aguas urbanas se asocian a falta de planificación y coordinación entre los diferentes actores institucionales implicados, por lo que el desarrollo de instrumentos que faciliten la integración se reconoce como una necesidad impostergable. En este sentido, los Planes de Aguas Urbanas (PAU) de Salto y Young son una experiencia piloto de planificación interinstitucional que contempla la integralidad de las aguas urbanas. Estas experiencias implicaron que la DINAGUA, las Intendencias Departamentales de Río Negro y Salto, y OSE, con el apoyo del Banco Mundial, acordaran una agenda de trabajo conjunto y sistemático para impulsar la Gestión Integrada de las Aguas Urbanas. Los Planes proponen consensuar una visión futura de la relación de la ciudad con sus aguas, líneas estratégicas y proyectos prioritarios. Entre sus principales objetivos se encuentran la incorporación de los ecosistemas acuáticos a la vida de las ciudades, la reducción de riesgos y la mejora

de la calidad de los servicios. Los Planes conforman una estrategia de colaboración y retroalimentación donde se articulan actores con prioridades, intereses y visiones diferentes. Se destaca, además, que los Planes brindan la posibilidad de tener flexibilidad táctica al disponer de una cartera de proyectos que pueden ser implementados según el presupuesto que se disponga. A modo de ejemplo, uno de los resultados del desarrollo del PAU de la ciudad de Young fue la implementación de un espacio de coordinación y articulación interinstitucional “Mesa de Aguas Urbanas de Río Negro” integrado por representantes del gobierno departamental, OSE y DINAGUA. Allí, en encuentros periódicos, se discuten, analizan y definen estrategias para gestionar y planificar las aguas urbanas en todas las localidades del departamento, posicionándose como una estructura puente que facilita la gestión y el

intercambio de los conocimientos generados. Este espacio fue formalizado mediante la firma de un convenio entre las instituciones involucradas (figura 3). A la experiencia en las ciudades de Salto y Young, se le sumó posteriormente la experiencia de Ciudad del Plata, financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo. Este último Plan está actualmente en proceso de aprobación para convertirse en normativa departamental. Si bien las experiencias fueron evaluadas positivamente, los futuros planes deben estar acompañados por los recursos financieros necesarios para ejecutar los proyectos definidos. Asimismo, la replicación de estas experiencias requiere más recursos humanos de los disponibles a la fecha. El desafío a futuro es la consolidación de los PAU como Planes Sectoriales de Ordenamiento Territorial.



Figura 3. Taller de Diagnóstico en Salto y firma del convenio para la instalación de la Mesa de Aguas de Río Negro.

c. Incorporación del riesgo de inundación a la planificación urbana. A partir del año 2008 se comienzan a implementar los Mapa de Riesgo de Inundación (MDR), una herramienta que permite localizar, controlar, dar seguimiento y representar en forma gráfica los agentes generadores de riesgo, los niveles de exposición de viviendas e infraestructuras y la vulnerabilidad de la población a verse afectada. Para su elaboración se realizan estudios hidrológicos e hidráulicos que permiten identificar zonas según frecuencia de inundación (mapa de amenazas) y un análisis socio-territorial que

permite evaluar la exposición y vulnerabilidad de las zonas afectadas (mapa de vulnerabilidad y exposición). El primero identifica las inundaciones por desbordes de ríos, arroyos, cañadas, mareas y desbordes del drenaje pluvial, y el segundo considera la cuantificación de población, viviendas y hogares expuestos a los eventos, el perfil socio-económico de grupos poblacionales asentados en las zonas definidas en mapas de amenaza, las características de las viviendas y los equipamientos urbanos. A partir de la integración de los diferentes mapas se definen las zonas según riesgo

correspondiéndole a cada zona medidas específicas. Las zonas de riesgo alto son aquellas que tienen altos niveles de vulnerabilidad y una frecuencia de inundación alta (probabilidad de ocurrencia mayor a un 10% anual), mientras que las de riesgo bajo tienen niveles menores de vulnerabilidad social y frecuencia de inundación baja (probabilidad de ocurrencia anual entre 1% y 0,2 %). En los sectores de ciudad con riesgo alto (zonas indicadas con color rojo, ver figura 4) se promueve la transformación del uso y ocupación del territorio a modalidades compatibles con la crecida. En aquellas zonas con riesgo medio y bajo (indicadas con color naranja y amarillo respectivamente, ver figura 4) se considera que la modalidad de ocupación predominante tiene capacidad de adaptación. Se propone, en estos casos, una caja de herramientas con medidas de adaptación de vivienda, de equipamientos adecuados, de normativas y de comunicación, entre otras. En los casos de riesgo bajo se autoriza la instalación de vivienda nueva pero se limita la instalación de aquellos equipamientos que ante una inundación podría afectar el funcionamiento de la ciudad (por ejemplo, hospitales) o aquellos que de inundarse podrían tener consecuencias para la salud de la población o el ambiente (por ejemplo, plantas de tratamiento de efluentes residuales). Asimismo, quedan identificadas las zonas aún no urbanizadas, pero con presiones de ocupación, denominadas zonas de riesgo potencial (indicadas en color gris). En estas zonas se plantean medidas de prevención promoviendo usos compatibles. La experiencia indica que cuando la ciudad no se apropia de estos espacios, estos son susceptibles de ser ocupados irregularmente, más allá de lo que indique la normativa urbana, por lo que su consideración se vuelve central. El MDR es utilizado para integrar la gestión de riesgo de inundaciones a los PLOT. Las propuestas incluidas en el MDR son posteriormente validadas por el ejecutivo y legislativo departamental y pasan a ser parte de la categorización de suelo de la localidad, con carácter normativo, quedando al mismo nivel jurídico que otras

disposiciones referidas a la edificabilidad como retiros, alturas máximas admitidas, entre otros. Su articulación dentro de los instrumentos de ordenamiento territorial resulta de gran relevancia para el desarrollo de procesos de planificación dado que brinda la posibilidad de compatibilizar las zonas de riesgo con la categorización del suelo, entre otros aspectos. Hay una retroalimentación estrecha entre el PLOT y el MDR, el primero necesita conocer la susceptibilidad del territorio de verse afectado, mientras que el segundo debe incorporar la visión urbano-territorial propuesta por el PLOT. A modo de ejemplo, la figura 4 presenta el MDR de la ciudad de Paysandú, el cual se encuentra actualmente aprobado, y forma parte de los instrumentos normativos de planificación territorial a nivel local. Desde el inicio, el objetivo fue lograr que el MDR no fuera solamente un trabajo técnico realizado a partir de la adaptación de las metodologías internacionales a la realidad local, sino un trabajo en conjunto, de capacitación y coordinación, en particular para que técnicos locales y tomadores de decisión, reconozcan la relevancia de la gestión del riesgo en el desarrollo local y lo incorporen a los instrumentos.

Los MDR cuentan con un mecanismo de actualización asociado a cambios en las dinámicas territoriales sin necesidad, por ejemplo, de pasar por el legislativo departamental si se realizan acciones que reducen los riesgos, cambios relacionados con el clima, o bien a mejoras en la información o modelos de evaluación. A la fecha se cuenta con once elaborados, siete de los cuales están aprobados por el legislativo departamental, seis en proceso de elaboración y cuatro con avances en los estudios necesarios para su elaboración, dando un total de 21 MDR. Como desafíos a futuro se encuentran la incorporación del cambio climático y de una visión eco-sistémica. Actualmente se está trabajando en un decreto reglamentario de las Directrices Nacionales de Ordenamiento Territorial que consolidará al MDR como un instrumento para la gestión del riesgo de inundación en las localidades con criterios nacionales establecidos.

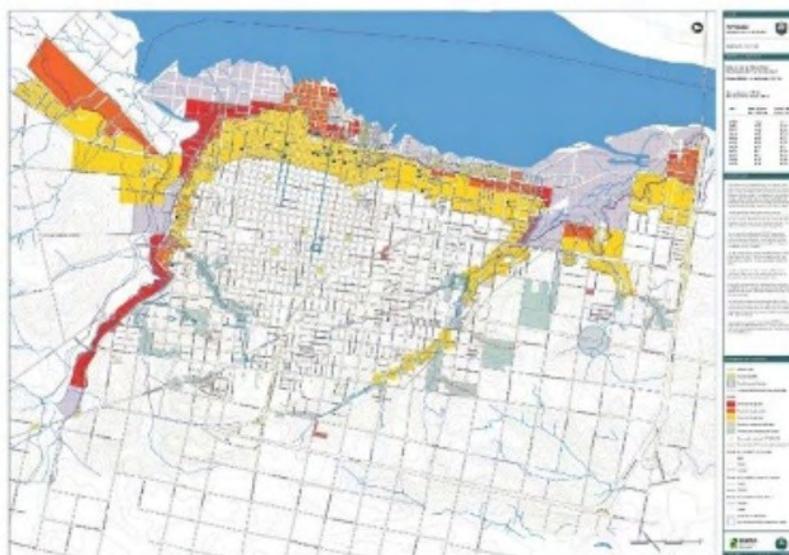


Figura 4. Mapas de Riesgo de las localidades de Paysandú (Fuente: elaboración propia).

#### 4.3 Implementación de medidas a corto plazo como parte de transiciones

Los cambios incrementales permiten que el sistema se adapte a las nuevas circunstancias y que se construyan nuevas estructuras alineadas con los objetivos a futuro con la finalidad de lograr transformaciones profundas. Bajo esta premisa, se presentan a continuación distintas experiencias que dan cuenta de los resultados de la aplicación de medidas a corto plazo.

a. Medidas a corto plazo alineadas a medidas a largo plazo. Tanto en el PNA como en los PAU, los objetivos, estrategias y programas con horizontes de ejecución a 20 y 30 años se articulan con medidas de urgente implementación. A modo de ejemplo, mientras en el PAU de Ciudad del Plata se definió la necesidad de implementar obras de saneamiento, drenaje, vialidad y espacios públicos en un horizonte de 30 años para una población actual de más de 35,000 habitantes, se identificó la oportunidad de modificar un sistema de tratamiento existente, permitiendo la construcción de una pequeña red de saneamiento que dará cobertura a 3,000 hogares al año 2020, reduciendo así los riesgos sanitarios, con las capacidades financieras actuales. En este sentido, las acciones a corto plazo no son

dispersas sino que se moldean en función de medidas a largo plazo.

b. Medidas a corto plazo que permiten fortalecer procesos locales. Los técnicos de las intendencias y municipios se enfrentan permanentemente a problemáticas asociadas a falta de capacidades técnicas o de información disponible. Para contrarrestar esta realidad se colabora a través de asesoramientos desde el gobierno central. Estas acciones a corto plazo se articulan con las estrategias y objetivos a largo plazo alineándose con la visión futura del país. Atender “a medida” demandas o temas acuciantes, genera un ámbito de diálogo que da oportunidad de aprendizaje mutuo y de fortalecimiento de la confianza entre instituciones. Desde el gobierno central se contribuye a lograr una comprensión global del problema, se brindan elementos e información oportunos y se acerca un catálogo de soluciones técnicas posibles. De esta manera, no solo se logra aumentar la calidad técnica de los proyectos, sino que se envía el mensaje a los gobiernos locales de que sus problemas no están siendo dejados de lado frente a temas más generales. Permite asimismo acumular experiencia y evaluar medidas específicas, que en caso de ser exitosas, pueden ser replicadas en otras

localidades. Este relacionamiento entre los distintos niveles de gobierno repercute no solo en el fortalecimiento de los equipos locales, los cuales logran mayor autonomía, sino en la generación de una red nacional técnicamente más equilibrada.

- c. Problemas urgentes que desencadenan procesos no previstos. Durante los procesos de planificación, se implementan subprocesos asociados que responden a problemáticas urgentes que no pueden detenerse a la espera de medidas de carácter más profundo. A modo de ejemplo, durante el desarrollo del proceso planificador de las aguas urbanas de Ciudad del Plata, con metas y cronograma de actividades definidos, se identifican altas probabilidades de falla estructural e hidráulica del dique de protección civil de Delta del Tigre. Esto genera un proceso paralelo de análisis de alternativas y proyecto ejecutivo de soluciones, alineado con el Plan en elaboración. Los impactos de esta identificación se producen fuera de los límites del trabajo específico, en particular asociado a la búsqueda de recursos financieros para implementar las acciones que reduzcan el riesgo de inundación.
- d. Problemas que deben ser resueltos hasta que se definan medidas integrales. Cuando no se cuenta con mapas de riesgo ni estudios hidrológicos que permitan identificar la inundabilidad de predios con viviendas asentadas o destinados a vivienda pública, DINAGUA asesora a técnicos de distintas oficinas del Estado en cuestiones que deben responderse en corto plazo. Se mantiene un intercambio permanente y se crea un procedimiento interno dentro del MVOTMA, en donde las oficinas responsables de la cartera de tierras, de la aprobación de subsidios para vivienda social y de la relocalización de asentamientos consultan sobre la posibilidad de inundación y el sistema de drenaje de predios específicos.
- e. Instancias de formación a partir de requerimientos. Para dar nuevos pasos hacia una gestión sustentable de las aguas urbanas se requiere incorporar el nuevo conocimiento disponible a la gestión. Esto no es posible si

no se cuenta con recursos humanos suficientes capaces de llevarlo adelante y hacerlo sostenible en el tiempo. En este sentido, se entiende necesario y posible implementar instancias de formación enfocadas a requerimientos específicos (por ejemplo, planificación sustentable de las aguas urbanas, participación, drenaje pluvial sostenible, gestión del riesgo de inundaciones). Se diseñan cursos-taller que incorporan en sus contenidos las demandas de los técnicos locales y cuentan con expertos invitados. Los cursos son interdisciplinarios, interinstitucionales y gratuitos, donde participan académicos, técnicos de consultoras privadas, técnicos de organismos del Estado y estudiantes que intercambian experiencias formal e informalmente. Los cursos cuentan con una instancia de evaluación al finalizar, donde se recogen sugerencias para próximos eventos o acciones. La evaluación a la fecha ha sido altamente positiva. Esta modalidad de curso le ha dado permanencia y fluidez a la red de intercambios técnicos y ha colaborado a evitar discontinuidades en los procesos.

## **5. CONCLUSIONES**

La reflexión realizada concluye que Uruguay está transitando por un proceso de cambio en la forma de visualizar, comprender, abordar y resolver los temas vinculados a las aguas urbanas para tender a ciudades más resilientes y sostenibles. Esto se manifiesta en un conjunto de acciones presentadas que en la práctica operan en forma sinérgica:

1. Implementación de políticas y normativa asociada a la gestión de aguas urbanas. A nivel nacional, se destaca la aprobación del PNA (2017) y la reglamentación (en proceso actualmente) de las Directrices Nacionales de Ordenamiento Territorial (2017). A nivel departamental, se resalta el desarrollo de 21 mapas de riesgo, muchos ya aprobados en el marco de los Planes Locales de Ordenamiento Territorial con carácter normativo. También, a nivel departamental, se cuenta con Planes de Aguas Urbanas, en particular dos casos piloto y

uno posterior en proceso de aprobación por los organismos legislativos departamentales.

2. Generación y mejora de información disponible. Se ha asumido la importancia de conocer la dinámica de los cursos de agua lo cual se refleja en aumento de 7 a 44 la cantidad de estudios hidrológicos e hidráulicos existentes. Adicionalmente, se ha avanzado en la caracterización y cuantificación de la población que reside en zonas inundables por desborde de ríos y arroyos. Se constata la existencia de información sobre eventos de inundación en 46 localidades frente a las 19 registradas en el año 2008. A su vez, toda la información existente se encuentra digitalizada e ingresada a una base de datos geoespacial facilitando su análisis, disponibilidad y transferencia. Se cuenta con cuantificación de los predios atravesados por pequeños cursos de agua urbanos, aproximadamente 14,500 predios entran dentro de esta categoría. Esta información es aplicada en los procesos de planificación territorial de las ciudades, como ser los Planes de Locales de Ordenamiento Territorial.

3. Fortalecimiento del trabajo en red. La conformación y fortalecimiento de redes interinstitucionales permite intercambiar información, generar análisis y protocolos en conjunto, contando con la experiencia y conocimiento de las distintas instituciones. Si bien se puede entender a la red como un medio para contar con una información determinada, o aumentar la eficiencia en los procesos, se instala como forma de trabajo que contribuye en el momento de planificar y gestionar de forma integral e interinstitucional las aguas urbanas.

4. Fortalecimiento de las capacidades locales. El aumento de la cantidad de técnicos en los gobiernos departamentales junto al apoyo brindado desde el gobierno nacional repercute en el fortalecimiento de los procesos locales aumentando la calidad de los proyectos. Se evidencia, además, un cambio de visión en relación a las aguas urbanas donde se revalorizan los cursos de agua, los ecosistemas asociados y la importancia de gestionar las aguas de forma integral. De todas formas se constata la necesidad de profundizar el proceso de fortalecimiento. El desarrollo y avance en estos temas no debe visualizarse como acciones

aisladas, sino como una serie de acciones que se retroalimentan. Por ejemplo, el relevamiento de una curva real de inundación aporta información para generar modelos hidrodinámicos más precisos, lo cual repercute en los mapas de riesgo que son integrados al Plan Local de Ordenamiento Territorial. Sumado a esto, en un futuro cercano se presentan una serie de avances que incidirán directamente en la calidad de la información de base para la planificación y la gestión, entre los que se destacan:

- Mejora de la red pluviométrica e hidrométrica. Esto permitirá entender mejor los eventos hidrometeorológicos y actualizar la información disponible para la gestión. Es necesario, de todas formas, incluir en dicha red algunos centros poblados que no están incluidos actualmente.
- Mejora de los modelos digitales de terreno. El sensible aumento de precisión a nivel nacional permitirá dar un salto cualitativo en los mapas de riesgo a desarrollar en un futuro próximo. Paralelamente, esto implicará la necesidad de capacitación técnica y hardware adecuado para su uso.

Lo anterior muestra un avance importante en los últimos diez años, sin embargo los problemas por resolver son aún relevantes y tienen un impacto indiscutible en la población nacional. Por ejemplo, actualmente cerca de 100,000 personas residen en áreas inundables, muchas de ellas socialmente vulnerables. Además, se detecta como obstáculo la rigidez de las estructuras gubernamentales así como la dificultad para comprender, tanto por los tomadores de decisión como por la población, que hay procesos largos que exceden a los tiempos políticos y la disponibilidad de fondos para llevar a cabo las acciones necesarias.

En el ámbito uruguayo se comienza a reconocer los co-beneficios de las soluciones basadas en la naturaleza, que al tiempo que acortan las brechas en demandas de infraestructuras con menores costos, reducen los riesgos y mejoran la calidad del ambiente y la vida de las personas. La profundización en su implementación y la incorporación una perspectiva ecosistémica en ciudades en las políticas públicas aparece como

un desafío. Cabe destacar que es escasa la normativa a la fecha en relación estas prácticas.

La brecha entre el avance en el conocimiento científico y la práctica es aún muy grande, la generación de mecanismos que incorporen la innovación a la práctica tiene que ser un tema de reflexión tanto como lo son los avances científicos en la materia. La realidad es dinámica y debe ser evaluada permanentemente, por lo que si el conocimiento científico queda aislado no existe posibilidad de incorporar la innovación al desarrollo de las ciudades.

Queda por delante un largo camino de trabajo, de adaptación de la experiencia internacional, de evaluar y replicar experiencias piloto nacionales. Transitar este camino requiere de la consolidación de una institucionalidad transversal que establezca el trabajo en red, con flujos de información compartida, con mecanismos eficientes de evaluación del ambiente y una autoevaluación permanente de las acciones. En este contexto es fundamental que las transformaciones se realicen desde múltiples ámbitos y con la participación de múltiples actores.

## REFERENCIAS

- Alberti, M., Marzluff, J. (2004). Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems* (8), 241-265.
- Allen, W. (2019). Building collaboration and learning in integrated catchment management: the importance of social process and multiple engagement approaches. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* (45), 3, 525-539.
- El Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. (2017 a). Ley N° 19525, *Directrices Nacionales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible*.
- El Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. (2017 b). Decreto N° 205/017. *Aprobación del Plan Nacional de Aguas*.
- El Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. (2009 a). Ley N° 18610. *Ley de política nacional de aguas*. Principios rectores.
- El Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. (2009 b). Ley N° 18621. *Creación del sistema nacional de emergencias público y permanente*.
- El Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. (2009 c). Ley N° 18567. *Descentralización política y participación ciudadana*.
- El Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. (2008). Ley N° 18308. *Ley de ordenamiento territorial y desarrollo sostenible*.
- Hauge, S. (2015). *Poniendo en práctica el pensamiento resiliente*. Siete principios para desarrollar la resiliencia en los sistemas socio-ecológicos. Editado por el Stockholm Resilience Centre. Estocolmo. 20 p.
- IPCC. (2014 a). Cambio climático 2014, Informe de síntesis. *Editado por IPCC*, Ginebra. 159 p.
- IPCC. (2014 b). Glosario del Quinto Informe de Evaluación del IPCC. *Editado por IPCC*, Ginebra 20 p.
- Narváez, L., Lavell, A., Ortega, G. (2009). La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos.
- Natenzon, C., Ríos, D. (2015). Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades. *Aporte desde la geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos*. Ediciones Imago Mundi, Buenos Aires, Argentina 200 pp.

ONU-HABITAT. (2016). Guía para la resiliencia urbana.

Piperno, A. (2009). Inundaciones urbanas en el Uruguay: del río amenaza al río oportunidad. *Colección Biblioteca Plural (CSIC)*. Montevideo, Uruguay. 195 p.

Piperno, A. (2015). Aguas urbanas en Uruguay: avances y desafíos hacia una gestión integrada. p. 542-573. En IANAS (Ed.). *Desafíos del Agua Urbana en las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias*. Editado por IANAS y UNESCO. México.

Rotmans, J., Loorbach, D. (2009). Complexity and Transition Management. *Journal of Industrial Ecology* (13), 184-196.

UNISDR. (2009). Terminología sobre gestión de riesgo de desastres. 43 p. Ginebra. Suiza.

*Como citar este artículo:*

Piperno, A., Benenati, S., Emanuelli, C., Cuadrado, A., Martínez, J., García, P., Alonso, D. (2019). Ciudades resilientes en LAC: aportes desde la gestión de las aguas urbanas en Uruguay. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 1-16. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-01

## Análisis del índice de sequía en caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma

*Analysis of hydrological drought index (SDI) using natural runoff in the mexican watershed of the river Lerma*

Ulises Salvador Díaz Barriga Arroyo<sup>1\*</sup>, Raúl López Corzo<sup>2</sup>, Teresa Lluviaria Ortiz Aguilar<sup>2</sup>, Irving Torres Miranda<sup>1</sup>, Enrique Galván Vargas<sup>1</sup>

Recibido: 14/06/2019

Aceptado: 14/08/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El interés de generar una alternativa de cuantificación para el pronóstico y evolución de la sequía empleando índices o indicadores que se usan a nivel mundial, ha generado la oportunidad de presentar los elementos e instrumentos que pueden ser fundamentales para el desarrollo y aplicación de las metodologías dentro de esta investigación. El recurso hídrico es un factor indispensable que interviene en distintos procesos de la humanidad. Por lo tanto, la escasez de este recurso genera graves conflictos entre los usuarios y las dependencias encargadas de regular el uso de las aguas nacionales. Actualmente existen distintas instituciones que se dedican a diseñar o aplicar índices de sequía tanto en el ámbito nacional como a nivel mundial. En México, es de particular interés el análisis, monitoreo o seguimiento de la sequía meteorológica e hidrológica; de tal forma que se han creado Programas de Prevención contra la Sequía. En el presente trabajo de investigación, se estimó el escurrimiento natural utilizando la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2015) en la cuenca del río Lerma. Posteriormente, se calculó el Índice de Sequía en Caudales (SDI, por sus siglas en inglés) empleando escurrimiento natural (restituido) y a su vez sobre registros hidrométricos, ambos criterios fueron evaluados por un segundo índice, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) es una variable completamente independiente dado que emplea precipitación. Finalmente, se estableció una correlación entre ambos índices de sequía (SDI y SPI), y se identificó la metodología que mejor caracteriza a una sequía hidrológica.

**Palabras clave:** correlación, escurrimiento, índice, indicadores, sequía, SDI, SPI.

### Abstract

*The interest of generating an alternative of quantification for the forecast and evolution of the drought using indices or indicators that are used worldwide, has generated the opportunity to present the elements and instruments that can be fundamental for the development and application of the methodologies within of this research. The water resource is an indispensable factor that intervenes in different processes of humanity. Therefore, the scarcity of this resource generates serious conflicts between users and the agencies in charge of regulating the use of national waters. Currently, there are different institutions that are dedicated to designing or applying drought indices both nationally and globally. In Mexico, the analysis, monitoring or follow-up meteorological and hydrological drought is of particular interest; in such a way that Drought Prevention Programs have been created. In this research work, natural runoff was estimated using the Official Mexican Standard (NOM-011-CONAGUA-2015) in the Lerma river basin. Subsequently, the Streamflow Drought Index (SDI) was calculated using natural runoff (restored) and in turn on hydrometric records, both criteria were evaluated by a second index, the Standardized Precipitation Index (SPI), is a completely independent variable since it uses precipitation. Finally, a correlation was established between both drought index (SDI and SPI), and the methodology that best characterizes a hydrological drought was identified.*

**Keywords:** correlation, runoff, index, indicators, drought, SDI, SPI.

1 Comisión Nacional del Agua, México. Calzada México-Xochimilco 4985, Coapa, Guadalupe, 14388 Ciudad de México, CDMX, email: ulises.diaz@conagua.gob.mx, irving.torresm@conagua.gob.mx y enrique.galvanv@conagua.gob.mx

2 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Paseo Cuauhnáhuac, 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, CP 62550, Tel. +52 (777) 3293600, México, email: raul\_lopez\_corzo@hotmail.com y teresa\_ortiz@tlaloc.imta.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo y análisis de la sequía en México ha sido de gran importancia en los últimos años, a tal grado que se ha puesto énfasis en estudiar el comportamiento de la sequía meteorológica e hidrológica; contando con organismos que destinan sus recursos para la caracterización de los eventos secos (CONAGUA, 2015). El Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), se creó en el 2013 con la finalidad de estimar los periodos secos o húmedos a partir de las dos variables más importantes; tales como; la precipitación y el escurrimiento. Algunos de los instrumentos aplicados por la PRONACOSE son el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en ingles) y el Índice de Sequía en Caudales o Escurrimientos (SDI, por sus siglas en ingles).

Los índices de sequía son medidas cuantitativas que caracterizan niveles de severidad mediante la asimilación y entendimiento de una o varias variables (indicadores); es este caso uno de esos indicadores son la precipitación y el escurrimiento; los cuales son dos variables completamente independientes (Esquivel *et al.*, 2014).

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) se basa solo en la precipitación (Hayes *et al.*, 1999), de tal manera que este índice caracteriza a una sequía meteorológica. El SPI fue desarrollado para categorizar precipitaciones como una desviación con respecto a una función normalizada de distribución de probabilidad de la precipitación (McKee *et al.*, 1995).

De acuerdo, con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), órgano operador en México; la ventaja que ofrece este índice es que cubre diferentes escalas de tiempo y puede aplicarse a los datos de precipitación de una estación climatológica. Por otra parte, el estudio de la sequía hidrológica mediante el Índice de Sequía en Caudales o Escurrimientos (SDI), fue desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2009); el cual permite determinar un evento seco a partir de los datos de caudal o escurrimiento; utilizando como base la metodología y los cálculos del índice SPI (OMM, 2016).

El SDI se basa en los volúmenes de caudales o escurrimientos acumulados por periodos escalonados de tres, seis, nueve y doce meses dentro de cada año hidrológico (Nalbantis, 2008), mediante la estandarización de las variaciones de los escurrimientos con respecto a su media, suponiendo que siguen una distribución normal. Por lo general, el escurrimiento sigue una probabilidad de distribución sesgada, la cual puede aproximarse a la familia de las funciones de distribución gamma (Arreguín *et al.*, 2016).

La presente investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento de la sequía hidrológica en una cuenca mexicana (río Lerma) al aplicar el SDI (*Streamflow Drought Index*) sobre escurrimientos naturales por cuenca propia, con base en la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2015) y a su vez sobre datos directos de hidrometría; es decir se estudiarán y compararán estos dos casos que en la práctica son empleados.

La hipótesis está sustentada en que los datos medidos en una estación hidrométrica sufren una alteración debido a los efectos antropogénicos que ocurren aguas arriba de la misma; lo cual queda resuelto si se realiza un balance hidrológico al funcionamiento hidráulico de la cuenca, obteniendo un escurrimiento natural restituído. Para ello, se realizó un análisis de la sequía hidrológica dentro de la cuenca del río Lerma en un periodo de 1980 al 2014. Finalmente, para determinar la veracidad de esta investigación se realizó una correlación entre el índice SDI (empleando ambas metodologías) y el índice SPI; este último es completamente independiente dado que utiliza datos de precipitación.

De tal manera que, al obtener dicha correlación se determinara que metodología; en el caso del índice SDI, es la que mejor se ajusta para analizar una sequía hidrológica.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Zona de estudio

La cuenca del río Lerma es una de las más complejas e importantes en México, está integrada por los ríos Lerma, La Gavia, Jaltepec, La Laja, Turbio, Angulo y Duero (figura 1), se ubica en los Estados de Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Querétaro y Estado de México, forma parte de la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago con una extensión de 54,448 km<sup>2</sup>, ubicada en el centro occidente del país entre los paralelos 19° 02' y 21° 34' de la latitud norte y de los meridianos 99° 17' y 103° 30' de longitud oeste. El clima predominante en la cuenca del río Lerma es el semi-cálido sub-húmedo, su temperatura media anual es mayor a 18°C y el promedio anual de precipitación es del orden de 810 mm (4% por arriba de la media nacional mexicana, que es de 77 mm) y la evapotranspiración media anual es de 665 mm (CONAGUA, 2016).

El cauce principal de la cuenca es el río Lerma; el cual nace a 4,600 msnm con una longitud de 708 km y se mueve a lo largo de la cuenca hasta desembocar en el Lago de Chapala a 1,600 msnm. El Lago de Chapala es el cuerpo de agua natural más grande de México con una longitud de 77 km y un ancho de 22 km. La cuenca Lerma se subdivide en 19 subcuencas considerando las cuencas cerradas del Lago de Pátzcuaro y Cuitzeo. Sin embargo, estas dos últimas no se consideran dentro del funcionamiento hidráulico de la cuenca, dado que no aportan ningún volumen de escurrimiento superficial al cauce principal. Además, en su interior se ubican las presas José A. Álzate, Ignacio Ramírez, Tepetitlán, Tepuxtepec, Solís, Ignacio Allende, Melchor Ocampo, así como los embalses naturales: el Lago de Chapala y la Laguna de Yuriria; mismas que serán analizadas en el presente trabajo de investigación (Díaz-Barriga, 2018).

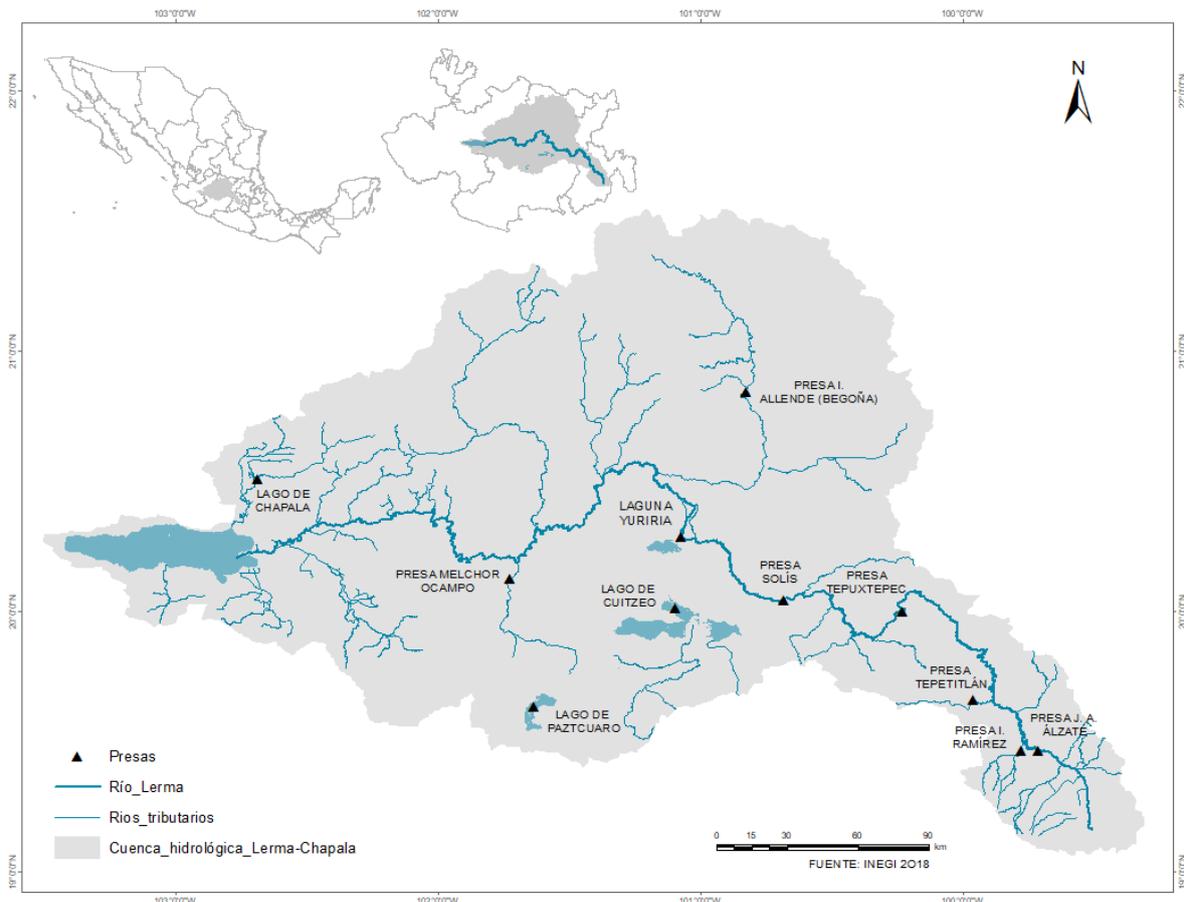


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio.

## 2.2 Ecuaciones básicas

El escurrimiento natural por cuenca propia ( $C_p$ ) se define en la NOM-011-CONAGUA-2015 como el “volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica” (SEMARNAT, 2002). Pero el escurrimiento natural también puede definirse como aquel volumen que escurre removiendo los efectos antropogénicos (actividad humana) de la cuenca en estudio. Su determinación requiere el ajuste

de los registros históricos de escurrimiento en las estaciones hidrométricas, quitando o removiendo los efectos que los grandes embalses artificiales (presas) o naturales (lagos, lagunas) generan al almacenar agua; así como, la derivación, el aprovechamiento para los diferentes usos, entre otros factores que contribuyen a la alteración de dichos registros (Silva, 2010). El escurrimiento natural anual o escurrimiento anual por cuenca propia ( $C_p$ ) de acuerdo a con lo publicado en la NOM-011-CONAGUA-2015, se determina mediante la siguiente expresión:

$$C_p = (A_b + E_v + E_x + U_c) - (A_r + R + I_m + \Delta_v) \quad (1)$$

Donde:

$C_p$	=	volumen de aportación por cuenca propia ( $hm^3$ )
$A_b$	=	volumen anual aforado de la cuenca aguas abajo ( $hm^3$ )
$E_v$	=	volumen anual de evaporación ( $hm^3$ )
$E_x$	=	volumen anual de exportaciones ( $hm^3$ )
$U_c$	=	volumen anual de extracción de agua superficial para diferentes usos ( $hm^3$ )
$A_r$	=	volumen anual aforado desde la cuenca aguas arriba ( $hm^3$ )
$I_m$	=	volumen anual de importaciones ( $hm^3$ )
$R$	=	volumen anual de retornos ( $hm^3$ )
$\Delta_v$	=	cambio o variación de almacenamiento anual ( $hm^3$ )

Para determinar el escurrimiento natural de la cuenca del río Lerma, se sumaron los escurrimientos generados por las sub-cuencas de los ríos La Gavia, Jaltepec, La Laja, Turbio, Angulo y Duero (figura 1), el periodo de análisis es del año 1980 a 2014, resultado así un gasto promedio de  $423.1 \text{ hm}^3/\text{mes}$  y un promedio anual de  $5,076.7 \text{ hm}^3$  (figura 2). Del análisis de la figura 2, podemos determinar que el escurrimiento natural por cuenca propia ( $C_p$ ) presenta un buen comportamiento a lo largo de la historia. Sin embargo, en el año del 2012 presenta un escurrimiento promedio anual de  $3,887.4 \text{ hm}^3$ ; registro que esta 23.93% por debajo de la media anual en la cuenca. Dentro de la literatura, podemos corroborar que este registro es lógico con respecto a lo ocurrido en México en materia de sequías, dado que se registra un evento seco extremo en el periodo de 2011-2012; el cual fue uno de los eventos más devastadores del siglo XX en el territorio mexicano (CONAGUA, 2016).

A su vez se realizó el análisis de los registros de la estación hidrométrica Chapala, con el mismo periodo de observación (1980-2014). La EH Chapala se ubica a la entrada del Lago del mismo nombre (figura 1), siendo este el punto de control o de estudio para ambos métodos. Por lo que es posible, realizar una comparación dado que el balance hidrológico de la cuenca determina el escurrimiento natural generado hasta el Lago de Chapala. Del análisis de los registros de hidrometría se obtuvo un escurrimiento promedio del orden de  $393.2 \text{ hm}^3/\text{mes}$  y un promedio anual de  $4,718.05 \text{ hm}^3$  (figura 3). De acuerdo con la Figura 3, podemos observar que existe una variación considerable con respecto a los registros hidrométricos, en el año 2003 se registra un escurrimiento de  $12,451.58 \text{ hm}^3/\text{anual}$ ; valor que está por encima del promedio anual. Por lo que, se comprueba la hipótesis de la presente investigación; dado que estos registros se encuentran alterados por los efectos antropogénicos de la cuenca.

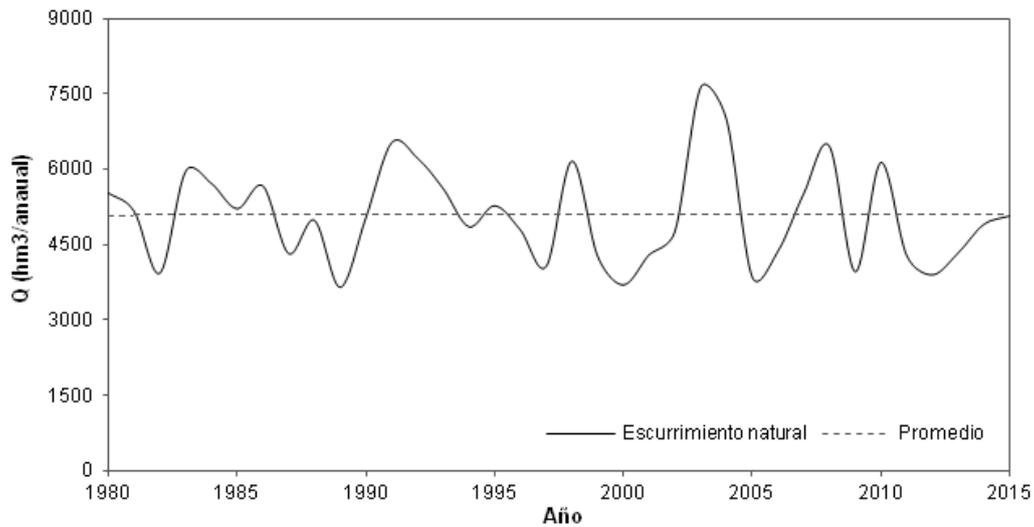


Figura 2. Hidrograma total de la cuenca del Río Lerma (1980-2014).

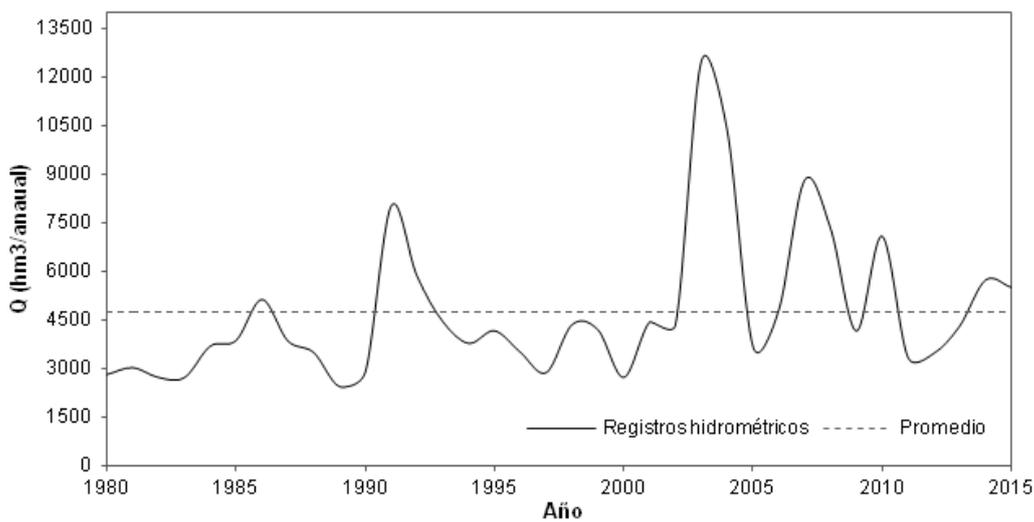


Figura 3. Hidrograma resultante de los registros de la EH Chapala (1980-2014).

Una vez obtenidos los escurrimientos naturales por cuenca propia ( $C_p$ ) y los registros históricos en la estación hidrométrica Chapala, se procedió a la aplicación del Streamflow Drought Index (SDI) creado por Nalbantis (2008) y Nalbantis y Tsakiris (2009). El SDI utiliza volúmenes acumulados de escurrimiento o caudal que se basan en periodos de tres, seis, nueve y doce

meses, los cuales se superponen para tener periodos de referencia dentro de cada hidrológico (Nalbantis, 2008). Para estimar este índice se requiere contar con una serie de escurrimiento o caudal mensual con registros continuos de 20 a 25 años para que el análisis sea estable (OMM, 2016). El SDI se define como:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad (2)$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen de escurrimiento acumulado en el año  $i$  trimestre  $k$ , es la media observada para el trimestre acumulado  $k$  y  $S_k$  es la desviación estándar en el periodo  $k$ . El valor de  $k$  es variable, así que  $k_1$  considera los volúmenes de octubre a diciembre,  $k_2$  de octubre a marzo,  $k_3$  de octubre a junio y  $k_4$  de octubre a

septiembre; el cual corresponde al año hidrológico completo (CONAGUA, 2012). Los valores que definen los estados de la sequía hidrológica mediante el uso del índice SDI se muestran en la tabla 1. En donde podemos observar que estos estados están asociados a una probabilidad ( $P$ ) y un periodo de retorno ( $T_r$ ).

Tabla 1. Definición de los estados de la sequía hidrológica mediante el SDI.

Estado	Descripción	Criterio	Probabilidad (%)	$T_r$ (años)
0	Sin sequía	$SDI \geq 0.0$	50.0	2.0
1	Sequía suave	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	34.1	2.9
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2	10.9
3	Sequía severa	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4	22.7
4	Sequía extrema	$SDI < -2.0$	2.3	43.5

Fuente: (López *et al.*, 2016).

En este sentido y considerando el planteamiento de (Nalbantis, 2008), es posible establecer series de tiempo mensuales de escurrimientos  $Q_{i,j}$ ;

donde  $i$  denota el año hidrológico y  $j$  el mes dentro de ese año hidrológico ( $j = 1$  para octubre y  $j = 12$  para septiembre):

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \quad i = 1,2,3, \dots, n; \quad j = 1,2,3, \dots, 12; \quad k = 1,2,3,4 \quad (3)$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen de caudal acumulado en el año hidrológico  $i$ -ésimo y  $k$  el periodo de referencia. Una vez definida de manera general la aplicación del método, a continuación, se presentan los resultados y análisis de los casos planteados. La distribución se transforma en una función normal, de tal manera que se propone utilizar la distribución log-normal de dos

parámetros; la cual fue propuesta por (Nalbantis, 2008) y (Nalbantis *et al.*, 2009). La normalización de estos valores se realiza mediante la obtención de los logaritmos naturales de los escurrimientos naturales o caudales. Por lo tanto, el índice SDI se define de la siguiente manera:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad k = 1,2,3,4 \quad (4)$$

donde

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad k = 1,2,3,4 \quad (5)$$

Son los logaritmos naturales del escurrimiento o caudal acumulado con media  $\bar{y}_k$  y desviación estándar  $S_{y,k}$  estadísticos estimados sobre un largo periodo de tiempo (Nalbantis, 2008). Con base en la ecuación 2, se estimó el índice SDI para los diferentes periodos de referencia ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$ ), aplicando la metodología antes descrita a los escurrimientos naturales restituidos

y a su vez a los registros históricos de la estación hidrométrica Chapala como se muestra en las figuras 4 a 7 del apartado de resultados y discusión. El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) desarrollado por McKee *et al.*, (1995), se basa en la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal (OMM, 2006). El cálculo del índice SPI tiene como base una función de

densidad de probabilidad Gamma (McKee *et al.*, 1995). Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son estimados para cada escala de tiempo. Posteriormente la probabilidad acumulada  $H(x)$  es transformada a una variable normal estandarizada con media cero y varianza uno, cuyo valor es el SPI

(García, 2014). El valor del SPI es más fácilmente obtenido usando una aproximación propuesta en 1965 que convierte la probabilidad acumulada a la variable normalizada  $Z$  a través de la siguiente expresión:

$$Z = SPI = - \left( t - \frac{C_0 + C_1 + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (6)$$

$$t = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad (7)$$

Las ecuación 6 y 7 son válidas para un intervalo de  $0 < H(x) < 0.5$  y el valor de los coeficientes para la ecuación 6 son:  $C_0=2.515517$   $d_1=1.432788$ ;  $C_1=0.802853$   $d_2=0.189269$ ;

$C_2=0.010328$   $d_3=0.001308$ . En la tabla 2 se muestra la clasificación del SPI, así como su probabilidad de recurrencia.

Tabla 2. Probabilidad de recurrencia del índice SPI.

Valor del SPI	Categoría	Probabilidad (%)
2.00 o mayor	Extremadamente húmedo	2.3
1.50 a 1.99	Muy húmedo	4.4
1.00 a 1.50	Moderadamente húmedo	9.2
-0.99 a 0.99	Normal	68.2
-1,00 a -1.50	Sequía moderada	9.2
-1.50 a -2.00	Sequía intensa	4.4
-2.00 o menor	Sequía extrema	2.3

Fuente: (McKee *et al.*, 1995)

Para determinar que metodología con respecto a la estimación del índice SDI, es la que mejor representa el comportamiento histórico de una sequía hidrológica dentro la cuenca del río Lerma; se realizó un análisis adicional para la calibración de los resultados, estimando para ello el índice SPI; el cual es completamente independiente al SDI y se basa en los registros de precipitación para los mismos periodos de referencia (escalas). Por lo que, es posible sobre poner a ambos índices en un mismo gráfico; cabe mencionar que existe un desfase natural entre la precipitación y el escurrimiento (CONAGUA, 2016). De tal manera, que es posible que exista una ligera diferencia al momento de caracterizar una sequía meteorológica e hidrológica, como se observa en las figuras 4 a 7.

### 3. RESULTADOS

Finalmente, se realizó un análisis para cada uno de los periodos de referencia del Índice de Sequía en Caudales. En la figura 4 se muestra el valor del SDI ( $k_1$ ) que considera el período octubre a diciembre, empleando datos de escurrimiento natural y a su vez sobre registros de hidrometría. Se puede observar que existe una diferencia al caracterizar la sequía para este periodo, dado que el SDI ( $k_1$ ) escurrimiento natural en la serie 2012-2013 estima una sequía extrema, mientras que utilizando hidrometría caracteriza con una sequía suave (ver tabla 1). Caso similar ocurre en el periodo 2005-2006 donde al emplear escurrimiento natural caracteriza con mayor intensidad. De la figura 5, se determina que en el caso del SDI ( $k_2$ ) escurrimiento natural presenta cinco años de

sequía moderada y episodio de sequía extrema en 2012-2013, el cual corresponde con la caracterización del SPI (6) equivalente a una sequía intensa en el periodo 2011-2012; es importante mencionar que existe un desfase natural entre la precipitación y el escurrimiento (CONAGUA, 2016), por lo que el análisis resulta bastante adecuado. En el caso de la estimación con registros hidrométricos se presentan tres años de sequía moderada, tres periodos de sequía severa y un episodio de sequía extrema (1982-1983). Además, es importante mencionar que no coincide ningún periodo de caracterización de eventos secos entre la aplicación de ambos métodos para el caso del SDI. Asimismo, en la figura 6 se observa que para el SDI ( $k_3$ ) escurrimiento en el periodo 2012-2103 se intensifica a una sequía extrema,

siendo que el SPI (9) presenta la misma intensidad. En el caso del escurrimiento natural para el periodo de referencia SDI ( $k_4$ ) año hidrológico completo, se presentan seis años de sequía moderada y dos años de sequía extrema (1988-1989 y 1999-2000); mientras que al emplear hidrometría indica que tan solo cinco ocasiones se presentó sequía moderada (ver figura 7). A su vez, podemos determinar que el SPI (12) presenta cuatro episodios de sequía moderada, un año de sequía intensa y uno de sequía extrema (2012-2013) de acuerdo con la clasificación de la tabla 2. De tal manera que, el análisis del SPI en cualquier escala detecta el evento meteorológico más devastador del siglo XX dentro del territorio mexicano (CONAGUA, 2016).

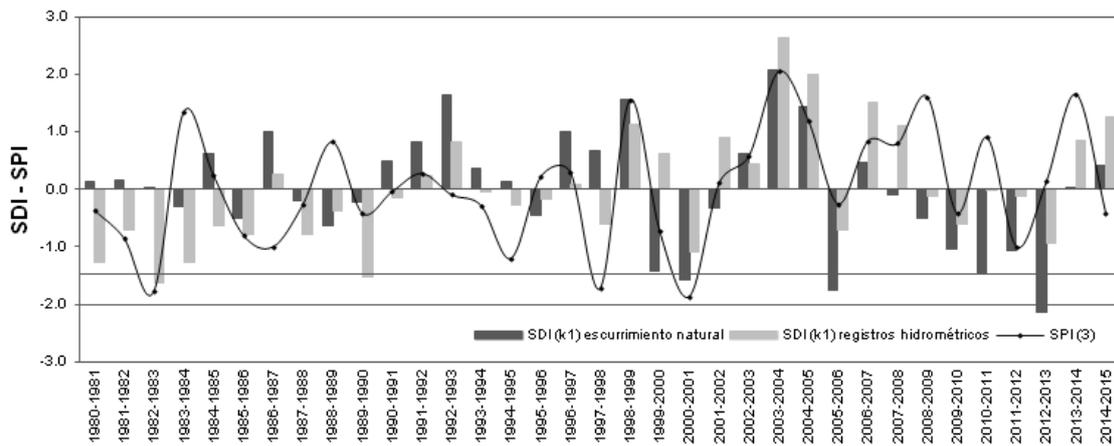


Figura 4. Series de los índices SPI (3 meses) y SDI ( $k_1$ ) octubre-diciembre aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos

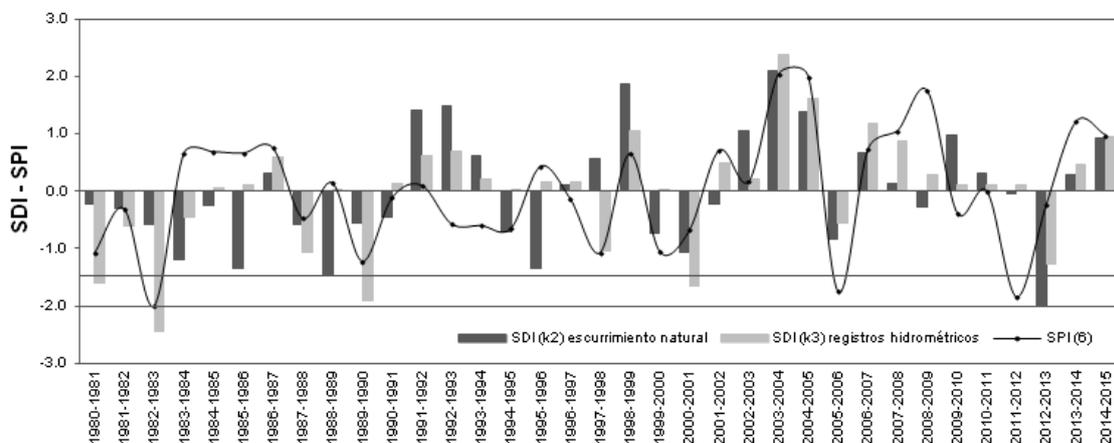


Figura 5. Series de los índices SPI (6 meses) y SDI ( $k_2$ ) octubre-marzo aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos

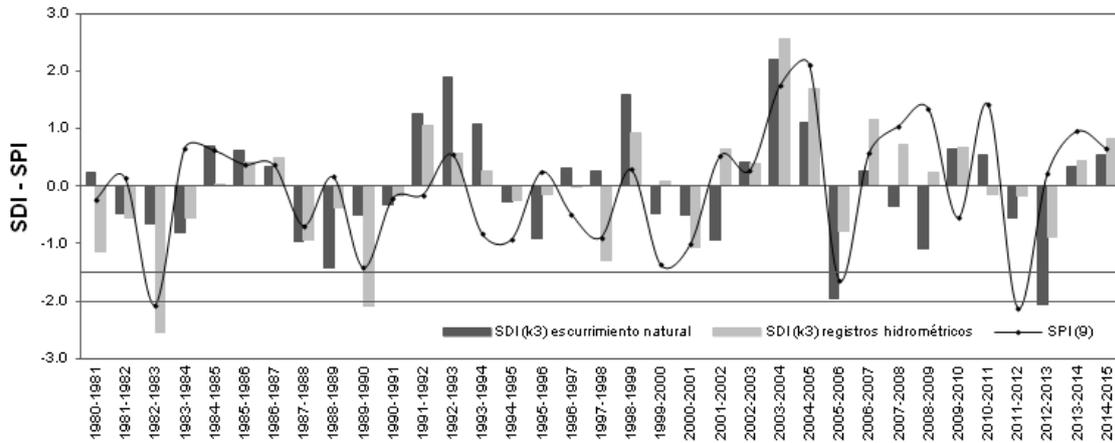


Figura 6. Series de los índices SPI (9 meses) y SDI ( $k_3$ ) octubre-junio aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos

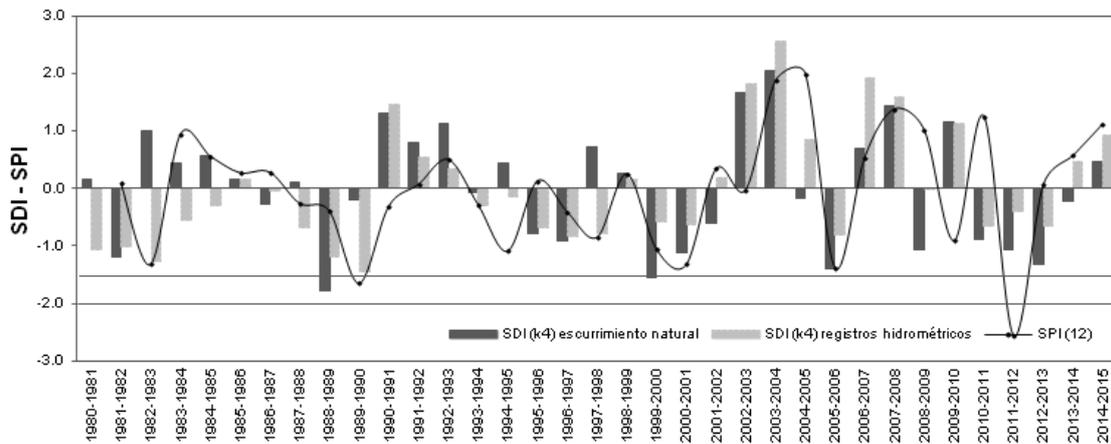


Figura 7. Series de los índices SPI (12 meses) y SDI ( $k_4$ ) octubre-septiembre aplicado a escurrimientos naturales y registros hidrométricos.

#### 4. DISCUSIÓN

Se determinó el grado de correlación de ambos índices de sequía aplicando el coeficiente de escurrimiento de determinación ( $R^2$ ); en el caso del SDI se correlacionaron ambos casos de estudios a) escurrimiento natural y b) registros hidrométricos. En la figura 8 se muestra el grafico de correlación de los índices SDI ( $k_4$ ) y SPI (12); dado que este periodo de referencia es el que presenta una mejor correlación entre ambos índices de sequía. De tal manera, que al aplicar el coeficiente  $R^2$  podemos observar que en el caso a) escurrimiento natural se tiene un grado de relación de 0.4134; mientras que en el caso b) registros de hidrometría, se obtuvo un

valor de 0.3054. De acuerdo con la clasificación del coeficiente  $R^2$  (ver tabla 3) se tiene que la relación del SDI ( $k_4$ ) escurrimiento natural y SPI (12) es regular; caso contrario ocurre con la aplicación a los registros hidrométricos, obteniendo una mala correlación de variables. Finalmente, del análisis de las figuras 4 a 7, se observa una diferencia importante entre la sequía que produce cada serie de escurrimiento natural con respecto a los registros de hidrometría; las cuales en estricto sentido deberían coincidir dado que se trata de la misma cuenca de estudio. Sin embargo, podemos notar que existe una buena correlación entre el índice SDI ( $k_4$ )

escurrimiento natural y SPI (12), debido a que ambas metodologías detectan ciertos periodos secos y húmedos. Obsérvese de la figura 1 que los registros hidrométricos están sujetos a la operación de las presas aguas arriba de la cuenca; por lo que se considera que estos

registros sufren una alteración considerable y, en consecuencia hace que se suavice la caracterización de la sequía hidrológica dentro de la cuenca, por lo que la hipótesis planteada al inició de la presente investigación es correcta.

Tabla 3. Clasificación del coeficiente de correlación  $R^2$ .

Menor de 0.30	0.30 a 0.40	0.40 a 0.50	0.50 a 0.85	Mayor de 0.85
Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Sospechoso

Fuente: (Díaz Barriga, 2018).

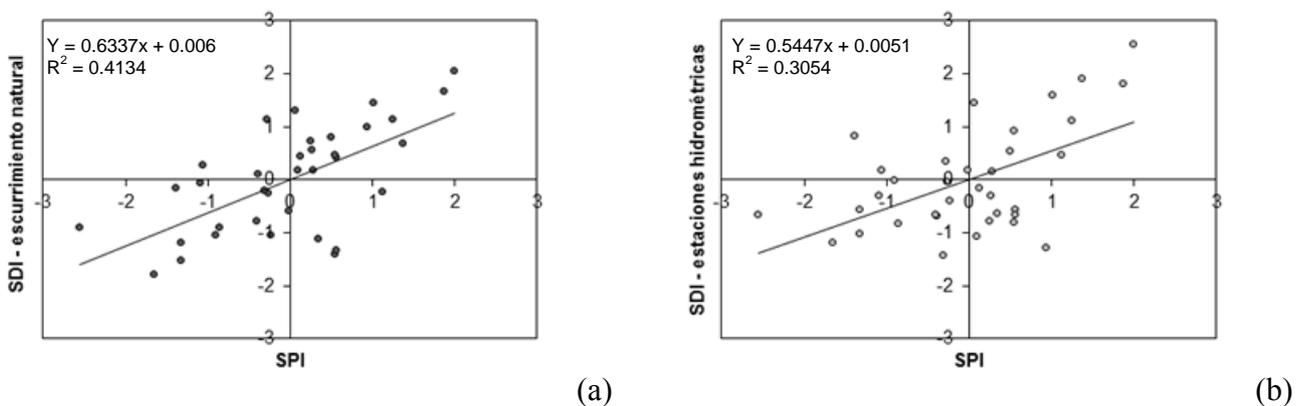


Figura 8. Recta de ajuste del SDI ( $k_4$ ) a) escurrimiento natural y b) registros hidrométricos, con respecto al índice SPI (12).

## 5. CONCLUSIONES

La obtención del escurrimiento natural por cuenca propia con base en la NOM-011-CONAGUA-2015, nos permite determinar un valor de escurrimiento (casi) real; dado que como se mencionó anteriormente; esta metodología remueve los efectos antropogénicos de la cuenca en estudio; determinando que existe una variación entre el escurrimiento restituído y los registros de hidrometría (ver figura 2 y 3); por lo que la hipótesis planteada con respecto a la alteración de los registros de las estaciones hidrométricas ubicadas aguas abajo de un embalse artificial (presa) es correcta, debido a que estos datos (aforados) están sujetos al operación y/o funcionamiento de las presas ubicadas aguas arriba o en su caso por la incorporación de volúmenes de agua provenientes de algún Distrito de Riego

(conocido como volúmenes de retorno). Si bien es cierto, esta metodología solo puede ser aplicable a cuencas aforadas, dado que se debe conocer los volúmenes de cada una de las variables que se encuentran relacionadas en la ecuación 1 de la presente investigación.

Con respecto al SDI, se determina que la variable de entrada al índice no afecta el análisis del mismo. Sin embargo, podemos decir que la metodología que presenta un mayor ajuste al momento de caracterizar un evento seco o húmedo con respecto a lo históricamente observado y/o documentado, es el uso de escurrimientos naturales (ver figura 4 a 7); caso contrario ocurre si se aplica a datos directos de hidrometría (aplicación actual), debido a que suaviza los efectos de la sequía; por lo que no representa realmente lo ocurrido durante este fenómeno natural. No obstante para que el análisis sea estable se requiere de una serie

mínima de 25 años efectivos. Por otra parte, la aplicación del SDI sobre escurrimientos naturales (restituidos) puede contribuir a corto, mediano y largo plazo estableciendo políticas hídricas de extracción y almacenamiento con respecto al funcionamiento hidráulico (presas) de la cuenca en estudio, ya que el conocimiento de la ocurrencia de una sequía puede ayudar en la mitigación, planeación y manejo del recurso hídrico a largo plazo. Asimismo, el calcular el SDI para distintos periodos de referencia (escalas) ayuda a comparar el comportamiento del escurrimiento a lo largo del año hidrológico; el cual en México comienza en octubre y termina en septiembre del año siguiente.

Finalmente, la estimación del índice SPI nos permite calibrar los resultados obtenidos con respecto al SDI, dado que es un índice que emplea una variable completamente independiente al análisis anterior (precipitación). Además, es posible sobre poner a ambos índices en un mismo gráfico, debido a que el SPI se basa en la metodología del SDI, utilizando los mismos periodos de referencia 3, 6, 9 y 12 meses equivalentes a  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$ . En el caso particular del SPI (12) y SDI ( $k_4$ ) escurrimiento natural presenta un buen ajuste (figura 7) y ambos caracterizan de manera similar los

eventos secos y húmedos presentados históricamente en la cuenca del río Lerma. Por otra parte, en el caso del SPI (12) y SDI ( $k_4$ ) registros hidrométricos identifica algunos periodos de sequía con respecto al SPI aunque como se describió anteriormente, el análisis es más suave. Por último, se estableció una correlación con ambos casos a) escurrimiento natural y b) registros hidrométricos, el primer caso de acuerdo al coeficiente de correlación de  $R^2$  se obtuvo un valor de 0.4134, considerado como regular (ver tabla 3) y para el segundo caso obtenemos un valor de 0.3054 (malo). De tal manera, que se obtuvo una relación gráfica y numérica entre ambos índices de sequía (SPI y SDI), concluyendo que es mejor la aplicación del SDI sobre escurrimientos naturales por cuenca propia y, a su vez es posible asociar un evento de sequía meteorológica e hidrológica. Esta metodología, puede aplicarse a cualquier cuenca hidrológica, siempre y cuando este instrumentada o cuente con la suficiente información pluviométrica e hidrométrica. Se recomienda el uso de este método en una cuenca de menores dimensiones (pequeña) para ver el efecto o la relación entre ambos índices, determinando una mayor relación entre ambos.

## REFERENCIAS

- Arreguín, F., López, M., Ortega, D. y Ibáñez O., (2016). La Política Pública contra la Sequía en México: Avances, Necesidades y Perspectivas. *Revista de Tecnología y ciencias del Agua*, Vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 63-76, Jiutepec, Morelos, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030, Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo*. Marzo de 2012, México D.F.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2015). *Plan General Maestro Estratégico de Investigación*. Subdirección General Técnica. México, pp. 1-10.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2016). *Seguimiento y evaluación 2016 del decreto por lo que por causas de interés público se suprimen las vedas existentes en la subregión hidrológica Lerma-Chapala, y se establece zona de veda en las 19 cuencas hidrológicas que comprenden dicha subregión hidrológica*. Informe final, México, pp. 1-448.
- Díaz Barriga, U., López R. Mora, H. (2018). *Análisis y caracterización de la sequía empleando los índices SPI y SDI, aplicando escurrimiento natural. Caso de estudio: Cuenca hidrológica Lerma-Chapala*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México. 144 p.

- Esquivel, A., Palmira N., Sánchez-Cohen I., Velásquez-Valle M. y Esquivel O., (2014). Evaluación del Índice de Sequía de Caudales en Cuencas del Norte-Centro de México. *Revista AGROFAZ*, Vol. 14, Número 2, pp. 53-60.
- García, Rugerío Ernesto, (2014). *Tema de Maestría. Índices de vulnerabilidad de las sequías en la cuenca del río Bravo*. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado de Maestría y Doctorado de Ingeniería. Ingeniería Civil. Especialidad en Hidráulica, Ciudad de México, México, 143 p.
- Hayes, M., Svodoba D., Wilhite D., and Vanyarkho O., (1999). Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bull. American Meteorological Society*. No. 80, pp. 429-438.
- López, R., Ortiz T. y Cruz F., (2016). *Análisis de sequías para la subregión hidrológica Lerma-Chapala aplicando el Índice de Escurrimientos Estandarizados (Streamflow Drought Index, SDI) en México*. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú, septiembre 2016, pp. 30.
- McKee, B., Doesken N., and Kleist J., (1995). Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, *Nineth conf. on Applied Climatology*. Dallas. Texas. AMS, pp. 233-236.
- Nalbantis, I., (2008). *Evaluation of Hydrological Drought Index*. European Water Publications. Vol. 23/24, pp. 67-77.
- Nalbantis, I. and Tsakiris, G., (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*. Vol. 23, No. 5, 2009, pp. 881-897.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros*. No. 1006.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2016). *Manual de Indicadores e Índices de sequía*. No. 1773, pp. 1-46.
- Secretaría de Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (2002), NOM-011-CONAGUA-2015. *Conservación del recurso agua – Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de abril de 2002, pp. 2-18 (Primera Sección), México D.F.
- Silva, H., (2010). *Modelo Matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas*. Tesis Doctoral, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Posgrado. Chihuahua, Chih., marzo de 2010. pp. 39-40.

*Como citar este artículo:*

Díaz-Barriga, U., López, R., Lluviaria, T., Torres, I., Galván, E. (2019). Análisis del índice de sequía en caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 17-28. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-02

## Avaliação do potencial de produção e de usuários de água de reúso em Maceió, Alagoas, Brasil

*Evaluations of water reuse utilization and identification of potential users in Maceió City, Alagoas State, Brazil*

Álvaro José Menezes da Costa<sup>1\*</sup>, Callado, N.<sup>2</sup>

Recibido: 18/07/2019

Aceptado: 19/09/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumo

O reúso de águas a partir do aproveitamento do efluente tratado em Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico, já é praticado em alguns países e no Brasil, porém carece ainda da quebra de alguns paradigmas associados a reação natural à água de reúso pelo sentimento de não se estar usando água tratada. Embora existam alguns exemplos de reúso não potável planejado em zonas rurais, ainda há um longo caminho a percorrer nas áreas urbanas. No entanto a condição de escassez hídrica motiva as regiões áridas e semiáridas do Brasil, juntamente com áreas urbanas que hoje possuem elevados consumos, a se transformarem em áreas potenciais para utilização de projetos de reúso, surgindo como oportunidades para implantar novas tecnologias. Assim, com base nos dados obtidos sobre as Estações de Tratamento existentes e a serem implantadas na cidade de Maceió, como também considerando as características de potenciais usos para Reúso Não Potável Industrial e Reúso Potável Indireto, foram feitos estudos que buscaram a partir deste trabalho, identificar Estações de Tratamento de Esgotos e usuários na região metropolitana de Maceió, capazes de utilizarem a água de reúso para vários fins. Os resultados mostraram que há um potencial de reúso de cerca de 60% do Volume Distribuído médio mensal para Maceió tomando 2016 como ano base.

**Palavras-Chave:** potencial de reúso, reúso potável indireto, reúso não potável industrial.

### Abstract

*The reuse of water from effluent treated in Wastewater Treatment Plants, is already practiced in some countries and in Brazil too, but still needs to break some paradigms associated with the natural reaction to drink or use recycled water. It looks like a feeling against the use of some amount of water reuse. While there are some examples of planned non-potable reuse in rural areas, there is still a long way to follow in urban areas. However, the condition of water scarcity motivates the arid and semi-arid regions of Brazil to be water reuse users. These regions along with urban areas that currently have high consumption can become potential areas for the utilization of water reuse projects, emerging as opportunities to implement new technologies. These studies were conducted to identify the best examples of Wastewater Treatment Plants and users in the metropolitan region of Maceió, able of using reused water for various purposes. To make the studies were used data obtained from the existing Wastewater Treatment Plant and others that to be implemented in the city of Maceió, as well as considering the characteristics of potential uses for Industrial Non-Potable Reuse and Indirect Potable Reuse. The results showed that there is a potential water reuse around 60% of the monthly average Distributed Volume for Maceió, taking 2016 as the base year.*

**Keywords:** potential of re-using; indirect potable reuse; non-potable industrial reuse teams.

1 AMEC – Álvaro Menezes Engenharia e Consultoria. e-mail: ajmsh@gmail.com Telefone: + 55 82 3028 4168/996087956

2 UFAL – Universidade Federal de Alagoas. e-mail: ncallado@ctec.ufal.br Telefone: +55 82 99992 8087

## 1. INTRODUÇÃO

Em escala global, a escassez de água, por si só, pode ser um fator a desencadear a necessidade de fazer com que o reúso passe a ser de fato encarado como uma alternativa para melhorar o balanço hídrico em muitos países que já estão convivendo com a escassez. A condição de escassez hídrica então motivaria nas regiões áridas e semiáridas do Brasil, com grande potencial a projetos de reúso, além das áreas urbanas que hoje possuem elevados consumos, com *per capita* significativos, que surgem, também, como demandas e oportunidades de reúso (HESPANHOL, 2002).

O reúso está dividido em dois grandes ramos: Reúso Potável – Indireto ou Direto; e Reúso Não Potável. Para estes tipos tem-se então uma descrição geral da classificação dos mesmos (Mancuso y Santos, 2003):

- a. Reúso Potável Direto (RPD): quando se utiliza por meio de tratamento avançado o efluente tratado de uma ETE-Estação de Tratamento de Esgotos que é diretamente reutilizado em um sistema de abastecimento de água;
- b. Reúso Potável Indireto (RPI): quando o efluente tratado de uma ETE é utilizado diretamente em sistemas de águas superficiais ou subterrâneas para posterior captação;
- c. Reúso Não Potável (RNP): pode ocorrer em algumas formas como: Uso agrícola; uso industrial, uso urbano (municipal), público, e uso ambiental na recarga de aquíferos e manutenção de vazões, principalmente com finalidades de recuperação do equilíbrio ambiental.

Maceió já se enquadra como uma área urbana com déficit em seus mananciais, tanto pelos estudos da Agência Nacional das Águas (ANA) como pelos realizados para o Plano Municipal de Saneamento Básico de Maceió (PMSB, 2016a, 2016b) ou Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH, 2010a, 2010b, 2010c). Ou seja, sob a ótica do balanço hídrico com avaliação da disponibilidade hídrica e das demandas, Maceió apresenta motivos para que se implante o reúso.

Avaliando pelo lado da existência de sistemas de esgoto que possam possibilitar a implantação de reúso, com modalidades a serem oportunamente definidas, pode ser feita uma análise a partir do que está hoje em operação e dos projetos de

ETEs que estão sendo atualmente implantados pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL), (Alagoas, 2010).

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi identificar ETEs e usuários, na região metropolitana de Maceió, com potencial para reúso de águas.

## 2. METODOLOGIA

A área de trabalho engloba a área metropolitana da cidade de Maceió, a qual compreende os municípios de Atalaia, Barra de Sto. Antônio, Barra de São Miguel, Coqueiro Seco, Maceió, Marechal Deodoro, Messias, Paripueira, Pilar, Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte (figura 1).

A área territorial definida serve como referência e limites para exploração de oportunidades para geração de água de reúso e potenciais usuários, está representada em cor verde na zona urbana de Maceió. A região metropolitana possui uma população residente estimada em 1,300,373 habitantes, de acordo com as projeções da SEPLAG/Governo do Estado. Vale ressaltar que, só Maceió, tem população estimada em 1,050,000 habitantes ou 80.75% da população da região metropolitana.

Dentro da área de estudo, o primeiro passo foi localizar ETEs capazes de poderem servir como fornecedoras de água de reúso. Para tanto, se levou em consideração a capacidade nominal das estações e sua localização.

Não há uma recomendação na literatura que estabeleça um limite para indicação de tipos de ETEs e as vazões nominais das mesmas que possam levar a sua escolha potencial para se fazer reúso. Desta forma, um desafio inicial foi estimar as vazões mínimas que poderiam ser consideradas para desenvolver os estudos tarifários.

Dessa forma, neste estudo foi definido que se trabalharia com vazões iguais ou maiores que 100 l/s (360 m<sup>3</sup>/h), de modo que se pudesse avaliar a potencialidade do reúso em seus vários tipos, desde o RNP ao RPI, buscando atingir usuários capazes de fazer uso regular e significativo da água de reúso, tendo viabilidade econômica em escala de atendimento nos

clientes que optem por esse sistema. Assim, a identificação dos potenciais fornecedores uso na região de estudo se pautou por:

- a. Verificação junto a CASAL projetos e contratos existentes para implantação ETEs em Maceió. Isto foi feito por meio de visitas técnicas e levantamento de

dados a direção e ao setor de projetos da CASAL.

- b. Coleta dados sobre a vazão das ETEs da CASAL em operação e projetadas. Isto foi feito por meio de consulta aos projetos existentes na CASAL.

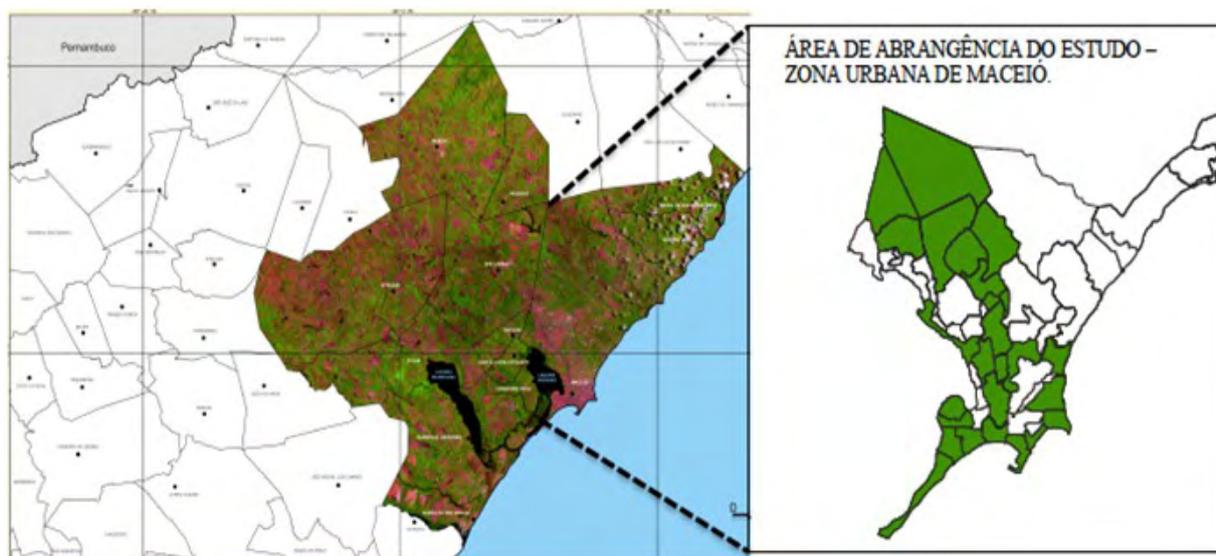


Figura 1. Mapa de localização da região metropolitana de Maceió e do estudo.  
Fonte: <http://dados.al.gov.br/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial>. 2016.

Na metodologia da pesquisa desenvolvida e com base na revisão da literatura, uma consideração que está implícita na escolha das ETEs e seus clientes, está relacionada com a regionalização dos possíveis fornecedores e usuários, ou seja, a localização das ETEs surge como oportunidade e desafio para definir tarifas que viabilizem o reúso.

Depois de localizar ETEs capazes de poderem servir como fornecedoras de água de reúso, buscou-se quais os clientes e usos potenciais para este serviço, fazendo-se as seguintes considerações:

- a. Como condição geral, se estabeleceu um raio máximo de 15 km entre a ETE com vazão estimada superior a 100 l/s, e o ponto de utilização. Este raio foi estabelecido em função da viabilidade de implantação de adutoras e redes de água de reúso.

- b. Identificação de empreendimentos, dentro deste raio de atuação, com potenciais demanda para RNP e RPI. Esta identificação foi feita por meio de imagem de satélite (Google Maps) e visitas locais.
- c. Avaliação dos tipos de reúso e consumos de cada empreendimento. Para uso industrial foi levado em conta os dados destes empreendimentos junto a Federação da Industria.

São necessários alguns comentários sobre a escolha dos potenciais usuários:

- Para o reúso industrial, entende-se ser possível a aplicação de uma estrutura tarifária, com base nas experiências existentes no Brasil e na possibilidade de se poder ter usuários concentrados em uma mesma área nas regiões a estudar, além do valor da tarifa da CASAL;

- Para o reúso urbano, a literatura mostra exemplos existentes e estudos, os quais se confrontam com a realidade local em que há uma demanda municipal potencial para irrigar parques, jardins e lavagem de ruas e outra, decorrente do valor da tarifa de CASAL que onera muito os custos de quem faz irrigação ou lavagem de pisos com a água fornecida pela empresa;
- Para recarga de aquífero e ambiental, o déficit hídrico que mostra desequilíbrio na relação oferta x demanda por água doce, além da contaminação já atestada nos poços da CASAL, é um fator que pode gerar demandas pelo reúso de água.

### 3. RESULTADOS

Levando-se em consideração ETEs capazes de fornecer vazões iguais ou maiores que 100 l/s (360 m<sup>3</sup>/h), a cidade de Maceió foi a que apresentou as melhores condições na região metropolitana para desenvolver o estudo, tendo sido identificadas três ETEs: uma ETE em operação na área do chamado emissário submarino de Maceió, que possui atualmente apenas tratamento primário mas já tem projeto para implantação de tratamento secundário, e duas novas ETEs projetadas, uma em contrato de PPP (Parceria Público Privada), CASAL, SANAMA, e outra no contrato de locação de ativos CASAL, SANEMA. A figura 2 ilustra a localização das ETEs identificadas como potenciais produtoras de água de reúso.

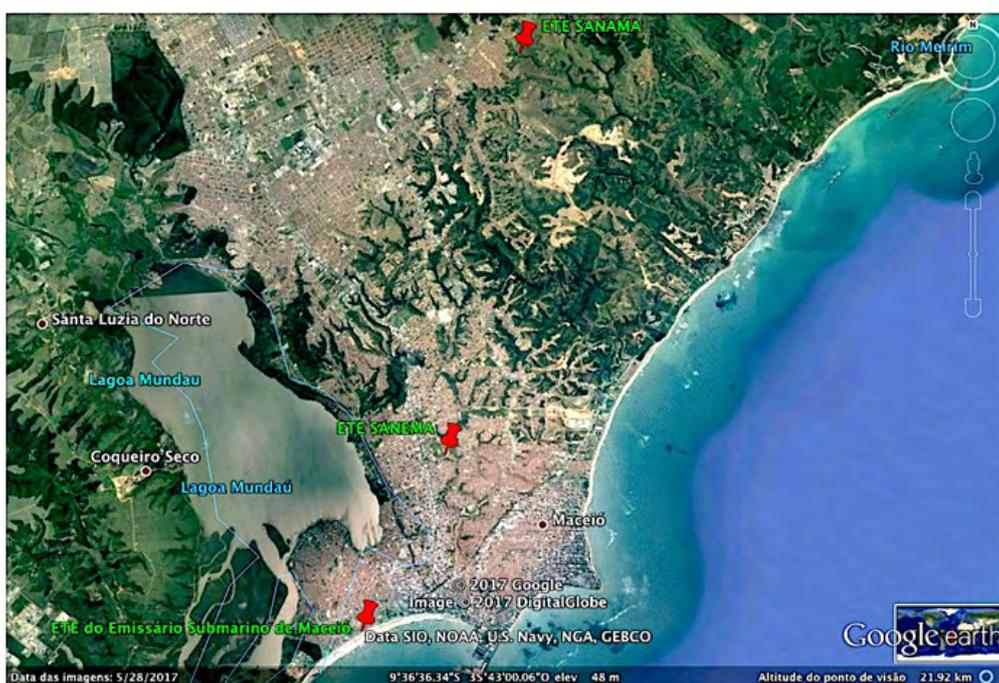


Figura 2. Indicação da localização das ETEs escolhidas para Maceió. Fonte: Google Earth.

As ETEs tem as seguintes vazões e características gerais:

- a. ETE da área de disposição oceânica do emissário submarino de Maceió: segundo dados fornecidos pela CASAL (Agosto, 2017), a vazão nominal é de 1,964 l/s (7,070 m<sup>3</sup>/h) e a vazão média varia entre 1,430 l/s (5,148 m<sup>3</sup>/h) e 1,575 l/s (5,760 m<sup>3</sup>/h). Considerando a vazão nominal da ETE para

reúso, 5,090,400 m<sup>3</sup>/mês, esse volume equivale a 42.9% do VD Volume Distribuído médio mensal de água potável para Maceió em 2016. Esta ETE já existe e é do tipo primário, fazendo apenas a separação de sólidos grosseiros e finos. Recebe também o esgoto de caminhões limpa fossas que coletam esgoto em áreas onde não há sistema de coleta público e esporadicamente recebe efluentes do tratamento de chorume do aterro

sanitário de Maceió e de algumas poucas plantas industriais. Está localizada na zona baixa de Maceió, na Avenida Assis Chateaubriand, na praia do Sobral e recebe todo esgoto das bacias sudeste, parte do Vale do Reginaldo e sudoeste. O que corresponde aos bairros do Pontal da Barra, Trapiche, Vergel, Ponta Grossa, Centro, Jaraguá, Pajuçara, Ponta da Terra, Ponta Verde, Jatiúca, Cruz das Almas, partes do Farol, Cambona, Jacintinho e Mangabeiras. Há o projeto de uma ETE, elaborado pela empresa AQUARUM para a CASAL em 2014, a ser construída na área da atual estação com a finalidade de modernizar e adequar o sistema atual a nível de tratamento secundário, beneficiando as bacias do Sudeste, Sudoeste, Mundaú e Vale do Reginaldo. A vazão estimada é de 1,333.3 l/s (4,680 m<sup>3</sup>/h) e o sistema de tratamento é basicamente do tipo lodos ativados, compostos especificamente pela IFAS (*Integrated Fixed-Film Activated Sludge*), seletor anóxico e decantador secundário. Em suma, o sistema de tratamento proposto é pela via biológica, com remoção secundária e eficiência de remoção de matéria orgânica superior a 90%.

- b. ETE da SANAMA: tem capacidade nominal de 385 l/s (1,386 m<sup>3</sup>/h). Considerando essa vazão para reúso, 997,920 m<sup>3</sup>/mês, esse volume equivale a 11.6 % do VD – Volume Distribuído médio mensal de água potável para Maceió em 2016. A ETE terá nível secundário de tratamento, porém quanto a tecnologia a ser empregada, em consulta formal a SANAMA, esta respondeu que o projeto se encontrava sob análise na CASAL, portanto nada podia ser divulgado, e a CASAL, também consultada, informou que aguardava informações da SANAMA sobre o projeto. Esta estação está projetada e as obras ainda não foram iniciadas, embora o contrato já esteja em andamento nos serviços da Parceria Público Privada (PPP). Situa-se basicamente na bacia de esgotamento do Tabuleiro e Pratygy, devendo atender quando pronta, aos bairros Santa Lúcia, Tabuleiro dos Martins, Clima Bom, Petrópolis, Santa Amélia, Benedito Bentes, Cidade Universitária, Antares, Salvador Lira e

Santos Dumont, beneficiando uma população aproximada de 300 mil pessoas, até 2021.

- c. ETE da SANEMA: tem capacidade nominal de 238 l/s (856.8 m<sup>3</sup>/h), que considerando esse volume para reúso, 616,896 m<sup>3</sup>/mês, esse volume equivale a 7.1 % do VD – Volume Distribuído médio mensal de água potável para Maceió em 2016. A ETE terá nível secundário de tratamento, cujo processo de é o de lodos ativados na sua variante MBBR (*Moving Bed Bio Reactor*), em regime de Fluxo Pistão (*Plug Flow*), precedido de seletor anóxico. A separação de fases será feita através de decantador lamelar, e a desidratação do lodo através de centrifugação. O tratamento será precedido de separação de sólidos, separação de gordura e desarenação. Esta estação está projetada e as obras ainda não foram iniciadas, embora o contrato já esteja em andamento nos serviços da locação de ativos. Este contrato beneficia duas bacias de esgotamento: Mundaú e Vale do Reginaldo, com coleta, tratamento e destinação adequada do esgoto na região dos seguintes bairros de Maceió: Farol, Pinheiro, Santo Amaro, Gruta de Lourdes, Canaã, Jardim Petrópolis, Serraria, Barro Duro, José Tenório Lins e Ouro Preto, devendo beneficiar uma população de 120 mil pessoas, até 2020. Para o desenvolvimento do projeto de reúso, se considerou, com base na revisão literária que se adotará como tratamento avançado a UF Ultrafiltração por ser um método mais barato que a OR Osmose Reversa e porque as finalidades propostas para Maceió não recomendam mais que UF.

### 3.1 Público Alvo e Usos Potenciais

Conhecidas as fontes geradoras de efluentes tratados de esgotos para aplicação de tecnologias complementares para produção da água de reúso e visando estruturar o estudo para os tipos de reúso propostos, os levantamentos feitos apontaram para as seguintes possibilidades de aplicação do reúso:

- a. A partir da ETE do emissário:
- a.1. RNP na Braskem com ênfase para reúso industrial, urbano e ambiental, já tendo havido uma manifestação técnica de

- interesse por reúso industrial para vazão de 347.2 l/s (1,250 m<sup>3</sup>/h). A Braskem já declarou para a CASAL, o interesse de utilizar até 1,250 m<sup>3</sup>/h do esgoto da ETE existente na área do emissário submarino de Maceió e iniciou os Estudos para dimensionar uma unidade de reciclagem de água.
- b. A partir da ETE do sistema da SANAMA:
- b.1 RNP no Shopping Pátio Benedito Bentes para reúso industrial e urbano (refrigeração, jardinagem, lavagem de pisos);
- b.2 RPI na bacia do Pratagy, com lançamento no Rio Pratagy próximo a atual captação de água da CASAL;
- b.3 RNP para o Pólo Industrial Governador Luiz Cavalcante visando reúso urbano e industrial (refrigeração, jardinagem, lavagem de pisos).
- c. A partir da ETE do sistema SANEMA:
- c.1 RPI para Recarga de aquífero na bacia sedimentar do Vale do Médio e Baixo Reginaldo;
- c.2 RNP visando a disponibilidade de água para coleta em carros – pipa para irrigação de parques e jardins e limpeza de rede coletora de esgoto.
- A ETE a ser construída pela SANAMA no Tabuleiro, no bairro Benedito Bentes poderá reforçar a vazão do rio Pratagy, contribuindo para equilibrar a produção para Maceió, nos períodos de estiagem, com água segura e garantida;
  - A ETE a ser construída pela SANEMA no bairro da Pitanguinha poderá gerar água de reúso para recarga do aquífero no Vale do Reginaldo, com água segura e garantida;
  - A ETE da área de disposição oceânica do emissário submarino de Maceió que poderá gerar água de reúso industrial.

Na prática do reúso nas três ETES projetadas, considerando as vazões nominais de cada uma delas, representaria uma economia ou preservação potencial estimada máxima de água na distribuição da CASAL ou mananciais de até:

- ETE Disposição Oceânica (Emissário): 61,084,800 m<sup>3</sup>/ano ou 5,090,400 m<sup>3</sup>/mês o que equivale a 42.9% do VD Volume Distribuído médio mensal para Maceió em 2016.
- ETE da SANAMA: 11,975,040 m<sup>3</sup>/ano ou 997,920 m<sup>3</sup>/mês o que equivale a 11.6% do VD Volume Distribuído médio mensal para Maceió em 2016.
- ETE da SANEMA: 7,402,752 m<sup>3</sup>/ano ou, 616,896 m<sup>3</sup>/mês o que equivale a 7.1% do VD Volume Distribuído médio mensal para Maceió em 2016.

#### 4. CONCLUSÕES

Existem em Maceió três ETES que possuem potencial de reúso, e que poderão ser utilizadas como fontes de água de RNP Reúso Não Potável e RPI Reúso Potável Indireto:

#### REFERENCIAS

- Alagoas, (2010). Consórcio IBI/ENGESOFT. Relatório Síntese, Volume 1, 340 p. Fortaleza, Ceará, 2010.
- Hespanhol, I. (2002). Potencial de Reúso de Água no Brasil Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de Aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 7(4) Out/Dez, 75-95.
- Mancuso, P., Santos, H. (2003). Livro: *Reúso de água*. Universidade de São Paulo. Faculdade de Saúde Pública. Núcleo de Informações em Saúde Ambiental. Editora Manole. ISBN 85-204-1450-8
- Perh, (2010a). *Plano estadual de recursos hídricos do estado de alagoas* Consórcio IBI/ENGESOFT. Relatório Técnico RT-03 - Gestão Institucional da Água, Volume 1, 211 p. Fortaleza, Ceará.

- Perh, (2010b). *Plano estadual de recursos hídricos do estado de alagoas* Consórcio IBI/ENGESOF. Relatório Técnico RT-04 – Planejamento, Programas e Projetos, Volume 1, 533 p. Fortaleza, Ceará.
- Perh, (2010c). *Plano estadual de recursos hídricos do estado de alagoas* Consórcio IBI/ENGESOF. Relatório Técnico RT-04 – Planejamento, Programas e Projetos, Volume 2, 182 p. Fortaleza, Ceará.
- PMSB, (2016a). Plano Municipal de Saneamento de Maceió. *Diagnóstico da situação do saneamento básico e de seus impactos nas condições de vida da população. Produto 2.4 - situação do sistema de abastecimento de água potável*. Revisão 3 Prefeitura Municipal de Maceió. MJ Engenharia.
- PMSB, (2016b). Plano Municipal de Saneamento de Maceió. *Prognósticos e alternativas para a universalização, condicionantes, diretrizes, objetivos e metas. Produto 3.2 abastecimento de água potável*. Revisão 02 Prefeitura Municipal de Maceió. MJ Engenharia.

*Como citar este artigo:*

Costa, A., Callado, N. (2019). Avaliação do potencial de produção e de usuários de água de reúso em Maceió, Alagoas, Brasil. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 29-38. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-03

### **Extended abstract**

This summary presents the steps to evaluate water reuse in the City of Maceio, as an opportunity to save potable water, improve the water balance and protect the water resources for the future. Thirty-six percent (36%) of Maceio's population is served by sewerage and 96% of the collect sewage is treated through one Wastewater Treatment Plant (WWTP), meaning that an important amount of wastewater is not treated in the capital of Alagoas State. Currently, there are two new WWTP under construction, which will increase both rates (sewerage and treatment) to 70% until 2021. Despite the advances on the sewage sector, the PERH (Plano Estadual de Recursos Hídricos) foresees a fresh water collapse in the city by 2025. The reasons for this tough prediction is the high level of leakages/unaccounted water followed by the increasing demand and also lack of efficient water resources management. Hence, water reuse can be a good solution to mitigate this situation. In order to proceed with the above-mentioned evaluation, the first step in the methodology was to define the study area: the Metropolitan Region of Maceio was chosen, which includes twelve municipalities (Atalaia, Barra de Santo Antonio, Barra de São Miguel, Coqueiro Seco, Marechal Deodoro, Messias, Paripueira, Pilar, Rio Largo, Satuba and Santa Luzia do Norte). The resident population in the study area is around 1,300,373 inhabitants according to SEPLAG (Secretaria Estadual de Planejamento e Gestão) projections. The next step was to locate the operational, planned or under construction WWTP in the area and to do so, it was defined a minimum flow of treated wastewater of 360m<sup>3</sup>/h (100 l/s). Pursuant to the methodology and based on the bibliography review, the definition of the WWTP location is a very important step because it allows the identification of suppliers and users. It means that the sites where the WWTP are located represent an opportunity and at the same time, a challenge to define feasible tariffs to the water reuse project. Subsequently, the study proceeded with the following steps:

- a. Definition of a circle with 15 km radius from the WWTP to identify the users. The 15 km are not mandatory but a simple assumption to proceed with the study.
- b. Classification of users as residential, commercial, industrial and public based on CASAL (Companhia de Saneamento de Alagoas) methodology by using google Earth and through local visits.
- c. Planning the different types of reuse for the study area: IPR (indirect potable reuse) and NPR (Non-potable reuse). The first occurs when the treated effluent can be used directly as water resources and the second occurs when it can be used only for non-potable uses such as agricultural under specific rules and urban uses such as street washing.
- d. Estimation of potential water reuse demand for each kind of user and the comparison of the water consumption in each region by category.

Given the innovative view of the works for the City of Maceió, it was necessary to make some assumptions to base the study, according to two types of water reuse, as follows:

- Industrial Reuse: According to relevant experiences this type of reuse is the most popular among technicians, public sanitation management and population because there is no direct contact between people and the treated effluent. Thus, this study prioritized WWTP located near some industries or Industrial Districts.
- Municipal and/or Urban Reuse: In this case and also based on previous experiences, the study recognized places such as public gardens, streets and sewerage as potential users. In this situation the use of reclaimed water for gardens and washing streets must be followed by specific regulation.
- Environmental Reuse: the study proposed the use of reclaimed water as a source to recharging aquifers and rivers, small dams or reservoirs.

With regards to potential users, it must be said that their selection was based on the following criteria: social and economic conditions, area's level of urbanization and industrialization and distance between the WWTP and the supply point. Among the results obtained from this study, we highlight the following: all of the WWTP chosen are able to supply enough reclaimed water to

serve the users identified, as described above. As a consequence, it was possible then to identify three WWTP with more than 100 L/s (360 m<sup>3</sup>/h) of flow in the study area, as follows:

- i. WWTP, Called Emissary of Maceió, which is currently in operation and has only primary treatment. It's important say, however, that CASAL already has a project to expand such WWTP to provide secondary treatment;
- ii. WWTP, Called SANAMA Treatment Plant, which is a project that will be built at the uptown region of Maceió, more specifically in the neighborhood of Benedito Bentes, and which was provided for in a Public Private Partnership agreement (PPP); and
- iii. WWTP, Called SANEMA Treatment Plant, which is a project that will be built in the Farol neighborhood and surroundings and which was provided for in Asset Leasing agreement. By 2021, these three WWTPs will serve around 780,000 people in the urban area of Maceió.

The WWTP Emissary of Maceió is located downtown, in the South area of the City and is very close to the sea. It receives all sewage collected from the Southeast and Southwest districts of Maceió, as well as from part of the Reginaldo Valley. In order to provide a more accurate view about the area of influence of such WWTP, it must highlight that such area includes the neighborhoods of Pontal da Barra, Trapiche, Vergel e Vergel do Lago, Ponta Grossa, Centro, Jaraguá, Pajuçara, Ponta da Terra, Ponta Verde, Jatiúca, Cruz das Almas, as well as certain sanitary districts from Farol, Cambona and Mangabeiras neighborhoods. With regards to terms of flow and volumes of sewage treated in the above-mentioned WWTP, according to data disclosed by CASAL in August 2017, the WWTP Emissary of Maceió has a nominal flow of 1,964 l/s (7,070 m<sup>3</sup>/h), and an average flow of 1,430 l/s (5,148 m<sup>3</sup>/h) to 1,575 l/s (5,760 m<sup>3</sup>/h). In its turn, the SANAMA Treatment Plant is located in the sanitation district of Tabuleiro dos Martins and Pratagy and, upon its total construction, it will collect all sewage from neighborhoods such as Santa Lúcia, Tabuleiro dos Martins, Clima Bom, Petrópolis, Santa Amélia, Benedito Bentes, Cidade Universitária, Antares, Salvador Lyra and Santos Dumont. Such WWTP will have secondary level of treatment, and, according to SANAMA, a nominal flow of 385 l/s (1,386 m<sup>3</sup>/h) in August 2017. Finally, the SANEMA Treatment Plant will benefit two sewage districts: Mundaú and Reginaldo Valley. Such new system will collect, carry, treat and proper dispose sewage from the following neighborhoods: Farol, Pinheiro, Santo Amaro, Gruta de Lourdes, Canaã, Jardim Petrópolis, Serraria, Barro Duro, José Tenório Lins and Ouro Preto, which, together, sum up to almost 120,000 people. Such WWTP will have secondary level of treatment and its nominal flow is of approximately 238 l/s (856,8 m<sup>3</sup>/h). The flow for reuse of all sewage treated in the above-mentioned WWTPs is estimated to be 75% of the nominal flow, which represents the maximum flow that can be used after wastewater treatment, pursuant to equipment designers', such as DOW Chemical Brazil recommendation. Moreover, another interesting outcome from this study was the identification of the potential users for the reclaimed water generated from the chosen WWTPs, as follows:

- a. SANAMA Treatment Plant. a.1 NPR – Non Potable Reuse: Reclaimed water for refrigeration and air conditioning, garden irrigation and floor washing. A Shopping Center located at 4.5 km away from the WWTP would classify as ideal user. Industries based in the Industrial District of Tabuleiro, also known as Governor Luiz Cavalcante Industrial District, which is located 7.6 km away from the WWTP, could use reclaimed water for equipment refrigeration, floor washing, garden irrigation and street washing. a.2 IPR Indirect Potable Reuse. Reclaimed water could be used to supply an extra amount of water to the Pratagy River, which is located 5 km away from the WWTP, in order to balance the flow during dry season. This River is the main water source of Maceió, but it is about to be in collapse due to lack of regular rainy season over the last years.
- b. SANEMA Treatment Plant. b.1 IPR – Indirect Potable Reuse: Reclaimed water could be used to recharge the aquifer at the Reginaldo River Basin, where there is an important groundwater production system. This proposal of recharge estimates that it could be made by deep wells. b.2 NPR – Non Potable Reuse: Reclaimed water could be used for waste dilution by direct launching into the Reginaldo River, which is, in fact, a great urban waste channel. Reclaimed

water could be used for garden irrigation, sewer washing and street washing, by installing a few collection points for tanks trucks that could transport the water reuse for the specific sites.

- c. Emissary of Maceió Treatment Plant. c.1 NPR Non Potable Reuse. This WWTP could be called a natural supplier of industrial water reuse, because it is close to the BRASKEM Factory, which produces Chlorine and Soda and is also a great supplier for the plastic industry, including of factory's pipes and other plastic utilities. BRASKEM's representatives met with CASAL's representatives in 2017 to show their project regarding the use of reclaimed water from this WWTP. The estimated flow was 1,250 m<sup>3</sup>/h. Reclaimed water could be used for garden irrigation, sewer washing and street washing, by installing a few collection points for tanks trucks that could transport the water reuse for the specific sites.

Notwithstanding the above, water reuse systems in certain parts of Maceió can only be implemented upon proper study of water reuse quality criterion, tariffs, as well as applicable regulation and legislation, which are currently underestimated in the study area.

To sum up, after identifying the three Wastewater Treatment Plants, we concluded that they could be used to produce reclaimed water, which would enable a water reuse project, particularly due to the following:

- a. The WWTP to be built by SANAMA will reinforce the flow of the Pratagy River, contributing, therefore, to balance the water production to Maceió during dry periods, with safe and guaranteed flow. It will contribute also to supply some industries and commercial sites in the region.
- b. The WWTP to be built by SANEMA will generate water reuse production to recharge the aquifer in the Reginaldo Valley, with safe and guaranteed water, as well as supply water reuse for urban uses, improving, therefore, the environmental balance;
- c. The WWTP at the Emissary of Maceió will be used as a water reuse production for industrial and urban uses, reducing, therefore, the potable water reuse in industrial uses.

The water reuse of could have major impacts in water saving and environmental protection, especially when are presented examples such as: the estimated water reuse volume at Emissary of Maceió Treatment Plant is of 5,090,400 m<sup>3</sup>/month. It represents 42.9% of the monthly average distributed volume of potable water in Maceió in 2016; In the SANAMA Treatment Plant, the estimated water reuse volume is of 997,920 m<sup>3</sup>/month. It represents 11.6% of the monthly average distributed volume of potable water in Maceió in 2016; finally, the estimated water reuse volume at SANEMA Treatment Plant is of 616,896 m<sup>3</sup>/month. It represents 7.1% of the monthly average distributed volume of potable water in Maceió in 2016. Hence, the study presented an interesting result about potable water saved. It means that in the City of Maceió there already is a real possibility to develop a water reuse project. Another conclusion, almost a reflection, is that the City is not able to receive a water reuse system because there are no patterns to create an efficient urban management. However, in a small to medium scale water reuse project as this study presents, the proposal to use reclaimed water by regions could be a good starting point for the City of Maceió to develop an effective water reuse master plan. In view of the above, it believes that a water reuse system in Maceió is feasible, provided that further studies to define CAPEX – Capital Expenditure, OPEX – Operational Expenditure and Tariffs are performed, based in this study's results.

## Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible como herramienta para resolver problemas de inundaciones urbanas. Experiencias en Costa Esmeralda

*Best Management Practices as a tool to solve urban flood problems. Experiences in Costa Esmeralda*

Gustavo Ariel Villalba<sup>1\*</sup>, Fernando Aldo Curto<sup>2</sup>, Nicolás José Malegni<sup>2</sup>  
Aquiiles Fabián Linfante<sup>2</sup>

Recibido: 04/07/2019

Aceptado: 21/07/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Los Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles también conocidos como BMP's (*Best Management Practices*) reproducen, en la medida de lo posible, el ciclo hidrológico natural previo a las actuaciones antrópicas. Su objetivo es minimizar los impactos del desarrollo urbanístico en cuanto a la cantidad y la calidad de la escorrentía (en origen, durante su transporte y en destino), así como maximizar la integración paisajística y el valor social y ambiental de la actuación. Por otro lado, los SUDS permiten resolver problemas de inundación urbana con bajo costo de intervención, los resultados obtenidos en trabajos realizados en ambientes costeros son favorables y alientan la utilización de este tipo de prácticas. El Master Plan de Costa Esmeralda difiere de los esquemas tradicionales de urbanizaciones en cuadrícula, el particular diseño orgánico une mediante amplios bulevares, 14 barrios de baja densidad, un barrio de media densidad, un campo de golf, un centro hípico con dos campos de polo, un centro deportivo, accesos a playa y a otros puntos de servicio, este trazado difuso genera espacios comunes que resultan de gran potencial para desarrollar puntos de infiltración. La red de agua para consumo se alimenta de acuíferos definidos como lentejas de agua, que se recargan con el ciclo natural de lluvias. El manejo de pluviales urbanos en localidades costeras se ha supeditado, en general, a la implantación de desagües perpendiculares a la línea litoral, estas prácticas limitan la recarga del acuífero. En localidades cercanas como Santa Teresita y Las Toninas donde los sistemas urbanos de control de aguas de lluvia responden a prácticas convencionales, el agua dulce se ha reducido en un 30% siendo reemplazada por intrusiones marinas. Se recomienda un plan de gestión sustentable que posibilite conservar y recuperar el agua subterránea dulce. Debido al particular trazado urbano, al suelo de implantación y la necesidad de preservación de la fuente de agua para consumo, Costa Esmeralda presenta oportunidades inmejorables para la utilización de herramientas SUDS.

**Palabras clave:** Drenaje Sostenible, Inundación, Trama Urbana, Ciclo Hidrológico.

### Abstract

*Urban Sustainable Drainage Systems reproduce, as far as possible, the natural hydrological cycle prior to anthropic actions. Its objective is to minimize the impacts of urban development in terms of the quantity and quality of runoff (at source, during transport and at destination), as well as to maximize landscape integration and the social and environmental value of the action. On the other hand, the SUDS allow solving urban flood problems with low intervention cost; the results obtained in works carried out in coastal environments are favorable and encourage the use of this type of practices. The Master Plan of Costa Esmeralda differs from the traditional schemes of grid developments, the particular organic design unites through wide boulevards, 14 low-density neighborhoods, one medium-density neighborhood, one golf course, an equestrian center with two polo fields, a sports center, access to the beach and other service points, this diffuse layout generates common spaces that are of great potential to develop infiltration points. The water network for consumption feeds on aquifers defined as water lentils, which are recharged with the natural rain cycle. The management of urban rainwater in coastal locations has been subject, in general, to the implementation of drains perpendicular to the coastline, these practices limit the recharge of the aquifer. In nearby towns such as Santa Teresita and Las Toninas where urban rainwater control systems respond to conventional practices, fresh water has been reduced by 30% being replaced by marine intrusions. It is recommended a sustainable management plan that makes it possible to conserve and recover fresh groundwater. Due to the particular urban layout, the ground of implementation and the need to preserve the source of water for consumption, Costa Esmeralda presents excellent opportunities for the use of BMP's tools.*

**Keywords:** BMPs, Urban Flood, Hydrological Cycle.

1 Espacios Verdes, Argentina. gusvillalba@uade.edu.ar

2 Costa Esmeralda, Argentina. fcurto@costa-esmeralda.com.ar; nmalegni@costa-esmeralda.com.ar; aquiiles@telpin.com.ar

## 1. INTRODUCCIÓN

Costa Esmeralda es una urbanización costera joven ubicada en el municipio de La Costa, provincia de Buenos Aires, Argentina. Con una superficie de 1,000 ha y un frente marítimo de tres kilómetros (figura 1). La parcela urbana está implantada sobre el ecosistema de Médanos

Costero, sus características geomorfológicas de Duna Costera, Crestas transversales, Barjan, Crestas barjanoides reversibles y Dunas en voladuras lo encuadran en una unidad de Campo de Dunas Activo (Villalba *et al.*, 2018; Villalba *et al.*, 2019), ver figura 2.



Figura 1. Ubicación de Costa esmeralda



Figura 2. Imagen histórica de Google Earth año 2003. Parcela de la urbanización Costa Esmeralda en línea amarilla

El Plan Maestro aplicado en Costa Esmeralda se define por un trazado orgánico que ordena el territorio en dos zonas. Una zona de baja densidad para vivienda unifamiliar que se está desarrollando desde 2008 que comprende 3,900 parcelas organizadas en 14 barrios, un centro hípico con dos campos de polo, un campo de

golf de 27 hoyos, un centro deportivo y tres paradores de playa, las distintas áreas se conectan por bulevares que funcionan como arterias principales de comunicación. Una segunda zona de media y alta densidad que se desarrolla sobre el margen sur y comprende el 30% de superficie de la urbanización (figura 3).



Figura 3. Diseño orgánico del Master Plan de Costa Esmeralda

- Zona 1 Zona 1, baja densidad
- Zona 2 Zona 2, media y alta densidad

La urbanización se encuentra en una avanzada etapa de desarrollo, más del 40% de las parcelas

de uso unifamiliar se encuentran ocupadas (figura 4).



Figura 4. Imagen de Google Earth del 30-06-2019. Estado actual de Costa esmeralda

En los últimos años se han registrado con mayor frecuencia precipitaciones más intensas y de menor duración, el 1 de marzo de 2019 se registró una precipitación de 48.8 mm en 110 minutos con una intensidad de 49.8 mm durante

15 minutos estos tipos de precipitaciones provocan inundación de calzadas y parcelas privadas, causando problemas y conflictos sociales (figura 5).



Figuras 5. Zona inundada en una zona de acceso

Como se ha mencionado anteriormente las acciones llevadas a cabo para el control de la de la escorrentía superficial de agua de lluvia y la mitigación de áreas inundables en localidades costeras, ha sido, en general, la implantación de

desagües perpendiculares a la línea litoral, la descarga de agua dulce directamente al frente costero altera el sistema de dunas y limita la recarga del acuífero (Bensey, 2017) (figuras 6 y 7).



Figura 6. Ingresiones de agua dulce de la red de desagüe pluvial tradicional. Erosión costera y pérdida de recarga del acuífero

Con el objetivo de preservar el ciclo hidrológico y de resolver problemas de inundaciones urbanas sobre calzadas y parcelas privadas en 2017 se pone en práctica un plan hidráulico basado en

estrategias SUDS, acopiando o retardando en origen, utilizando zanjas o badenes permeables durante el transporte y realizando drenes de infiltración en destino.



Figura 7. Erosión por descarga directa desde calzada con pendiente hacia el litoral. Pérdida de recarga del acuífero

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Determinar mancha y punto de inundación

Se realizó un mapeo sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG) operado por QGIS. La planimetría de la mancha de inundación se obtuvo con estación total y se vinculó geográficamente con puntos de control. Los puntos de inundación se identificaron de

forma visual y se ajustaron según relevamiento plani-altimétrico de centro de calzada. La figura 8 muestra una mancha de inundación tomada el día 21 de diciembre de 2018 luego de una precipitación diaria de 161 mm con una tasa máxima de 42.5 mm presenta una superficie de 852 m<sup>2</sup>, una profundidad máxima de 0.35 m dentro de una parcela privada y su tiempo de infiltración total fue de 36 horas.

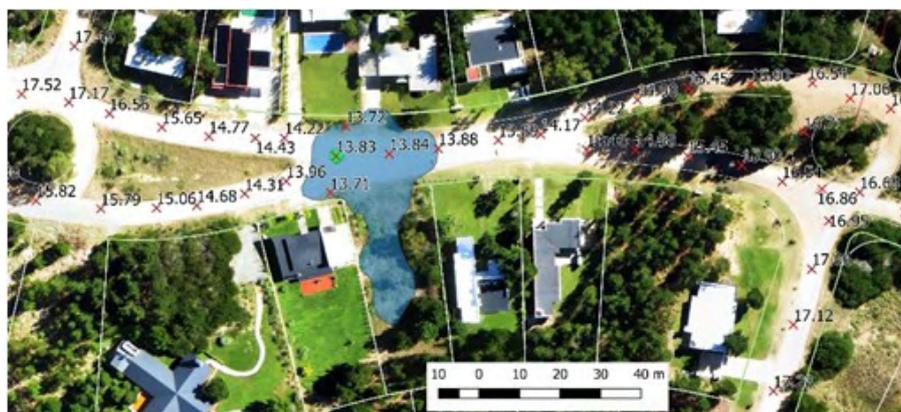


Figura 8. Mancha y punto de inundación

Sobre un Modelo Digital de Terreno (MDE) existente se aplicó la herramienta “extracción de curvas de nivel” para obtener una capa con curvas de nivel con equidistancia 1m, estas

curvas fueron validadas por un relevamiento plani-altimétrico de perfiles longitudinales sobre centro de calzada realizado con equipo GPS geodésico (figura 9).



Posteriormente, debido a la composición del suelo y su diferencia en la tasa de infiltración, se determinaron las superficies de calzada, compuesta por tosca y arena en partes iguales y de vereda formada por suelo natural pudiendo tener o no cobertura cespitosa (figura 11).

### 2.3 Determinación del volumen de aporte

El volumen de aporte se determinó utilizando una lluvia de diseño de 30 mm que cubre más del 80% de las tasas de precipitación ocurridas

en los últimos 24 meses (Gráfico 1). Las superficies de aporte presentan pendientes muy variadas y abarcan dos tipos de suelos con coeficientes de escorrentías muy distintos, la superficie de calzada y la superficie de vereda (Perales, 2008). Debido a la ausencia de datos locales se utilizó una tabla de coeficientes de escorrentía (Martínez de Azagra, 2007). La cual proporciona coeficientes de escorrentía según cobertura y tipo en relación al porcentaje de pendiente (tabla 1).

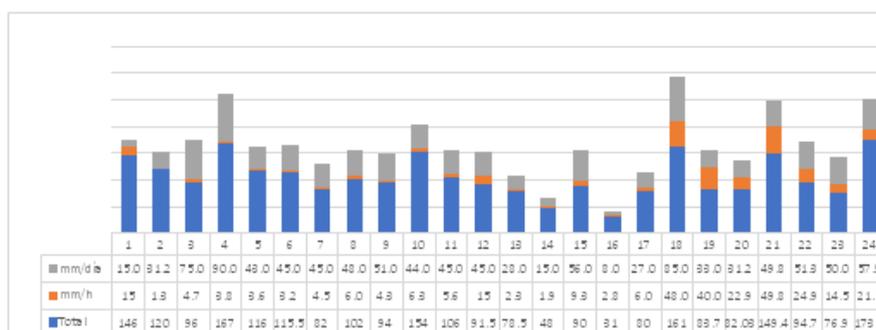


Gráfico 1. Lluvia máxima diaria, tasa de precipitación y lluvia total mensual para el período entre julio de 2017 y junio de 2019. Obtenido de estación meteorológica propia. Daza DZ-WT1081

Tabla 1. Coeficientes de escorrentía

Cobertura de Suelo	Tipo de Suelo	Pendiente (%)				
		0-1	1-5	5-20	20-50	>50
Sin vegetación	Impermeable	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
	Semipermeable	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
	Permeable	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
Cultivos	Impermeable	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
	Semipermeable	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
	Permeable	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
	Semipermeable	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
	Permeable	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
Hierba	Impermeable	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
	Semipermeable	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
	Permeable	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
	Semipermeable	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
	Permeable	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25

Para documentar el proyecto se realizaron perfiles altimétricos con nivel óptico de tercer orden (figura 12). Paralelamente se clasificaron las tipologías SUDS más conveniente para cada

situación surgiendo las siguientes posibilidades de intervención:

- Baden abierto a dren natural,

- Boca de tormenta, pozo de decantación y entubado a dren natural
- Dren construido in situ
- Baden abierto a dren construido,
- Boca de tormenta, pozo de decantación y entubado a dren construido
- Volumen subterráneo de infiltración

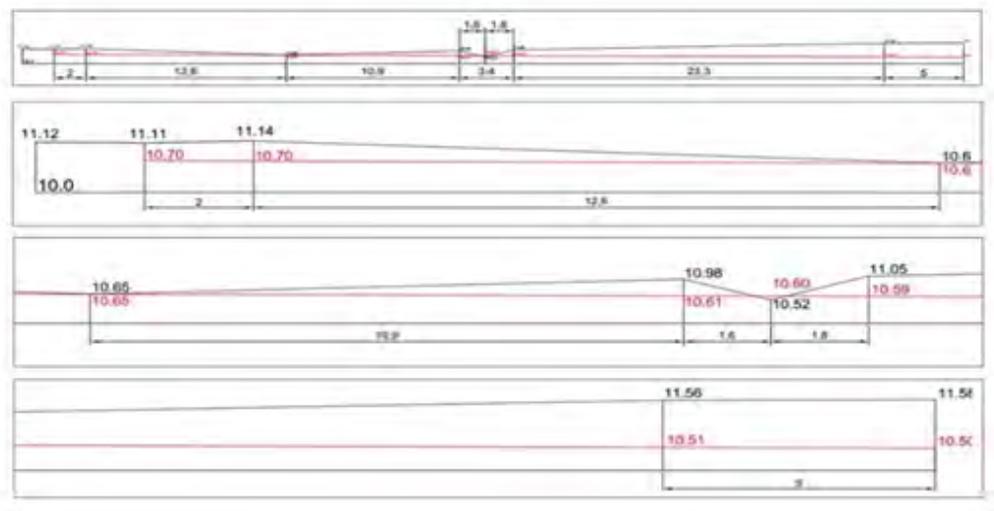


Figura 12. Perfiles longitudinales y transversales con nivel óptico de tercer orden

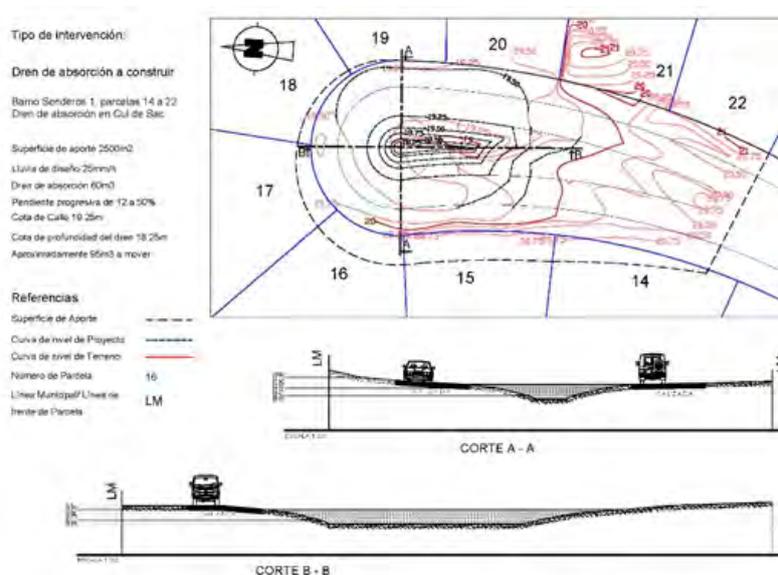


Figura 13. Ejemplo de documentación de proyecto para ejecución y control de obra, de un dren de absorción en un cú de sac

Con la tipología SUDS y los datos de campo se realizó un proyecto de intervención con los detalles constructivos para replanteo y control de obra (figura 13). El movimiento de suelo se realizó con pala mecánica y hoja de arrastre, durante la ejecución se realizaron controles

periódicos de niveles con nivel óptico de tercer orden (figuras 14 a 17). Para controlar el comportamiento y registrar el tiempo de infiltración total se realizan inspecciones de obra para tasas superiores a 10 mm/h (figuras 18 a 20).



Figura 14. Hoja de arrastre realizando badén central para transporte de agua



Figura 15. Dren de absorción realizado en espacio común dónde descarga el badén



Figura 16. Obra finalizada



Figura 17. Ortofoto de la obra terminada



Figura 18. Comportamiento del badén luego de una precipitación de 52 mm con una tasa máxima de 22 mm/h



Figura 19. Comportamiento del dren de absorción luego de una precipitación de 52 mm con una tasa máxima de 22 mm/h



Figura 20. Estado de la calzada y el badén al 8h de finalizada la precipitación

### **3. RESULTADOS**

Los proyectos ejecutados han resuelto el problema de inundaciones en calzadas o parcelas privadas. La situación favorable del suelo arenoso en el que se desarrolla la urbanización

permitió resolver problemas de inundación con precipitaciones superiores a la lluvia de diseño utilizada. Se han encontrado algunos problemas menores de erosión por escorrentías debido al tipo de material que compone la calzada, eso

provoca la formación de sedimentos que disminuyen la tasa de infiltración del suelo natural.

reducidos costos de obra. Debido al sedimento se hace necesario establecer un plan de mantenimiento para recomponer los valores de infiltración del suelo natural.

#### **4. CONCLUSIONES**

Las acciones llevadas adelante en plan hidráulico han resuelto los problemas de inundaciones urbanas con bajo impacto de intervención y

#### **Agradecimientos**

Al personal de Costa Esmeralda y a EIDICO.

#### **REFERENCIAS**

- Bensey G, (2017). *La percepción ambiental del turista en destinos del litoral*. Estudio comparativo entre Villa Gesell y Pinamar (Argentina). IV Congreso Latinoamericano de Investigación Turística. Facultad de Ciencias Sociales y Económicas. UNMDP.
- Martínez de Azagra Paredes A. (2007). *Método de los coeficientes de escorrentía*. Mauco Generalizado. Revista Medio Ambiente. Recursos Hídricos N° 65, ISSN 1900-6241. Polifonía Editores, Valladolid, España.
- Perales Momparler S. y Doménech I. (2008). *Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: Una alternativa a la gestión del agua de lluvia*. IX Simposio de Hidrología Elche, Alicante, España
- Villalba G., Malegni N., Linfante A., y Curto F. (2018). *Costa Esmeralda, experiencias en el manejo de pluviales aplicando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. 4° Encuentro de Investigadores en Formación 2018, Instituto Nacional de Agua, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.
- Villalba G., Curto F., Linfante A. y Malegni N., (2019). *Costa Esmeralda, manejo de pluviales aplicando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Trabajo aceptado para su publicación en actas en el IX Congreso Internacional de Ordenación del Territorio, Santander, España.

*Como citar este artículo:*

Villalba, G., Curto, F., Malegni, N., Linfante, A. (2019). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible como herramienta para resolver problemas de inundaciones urbanas. Experiencias en Costa Esmeralda. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 39-49. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-04

## Verificación de la estabilidad estadística de la serie de caudales del río Paraná en la sección Corrientes

*Verification of the statistical stability of the Paraná river flow series in the Corrientes section*

Marcelo Gómez<sup>1\*</sup>, Jorge Pilar<sup>1</sup>, Alejandro Ruberto<sup>1</sup>, Carlos Depettris<sup>1</sup>  
Guillermo Méndez<sup>1</sup>

Recibido: 23/08/2019

Aceptado: 05/09/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

En el presente trabajo se evalúa el comportamiento estadístico de la variable hidrológica caudal medio diario en la sección Corrientes del río Paraná. Si bien la variable hidrológica que se mide es la altura hidrométrica, la serie de caudales (oficial) se obtiene a partir de la relación altura-caudal en esa sección. Concretamente, se analizó el efecto de la longitud de la serie temporal en las estadísticas que la describen. Como datos de base se utilizó la serie temporal 1904-2016 (serie total), poniendo énfasis en los últimos 46 años (1970-2016, denominada serie moderna), que a los efectos del presente trabajo se fraccionó en los períodos 1970-2000, 1970-2010 y 1970-2016. Para esas series se calcularon las siguientes estadísticas: media, desvío estándar, coeficiente de variación, coeficiente de asimetría, coeficiente de kurtosis, valor máximo y mínimo.

La estadística descriptiva es la base de la inferencia estadística, que se utiliza para definir eventos críticos de diseño en obras hidráulicas de importancia, como por ejemplo los sistemas de defensa contra inundaciones fluviales de varias ciudades capitales de provincia del nordeste argentino que se localizan sobre las márgenes de río Paraná. Este trabajo busca aportar insumos para la discusión sobre los estándares de seguridad de las obras ya construidas.

**Palabras clave:** río Paraná, caudales, estadísticas, obras hidráulicas.

### Abstract

*The present work evaluates the statistical behavior of the hydrological variable of the daily media flow at Corrientes section of Paraná River. Even when the hydrological variable which is measured is the hydrometric height, flow series (official) are obtained from the relation height-flow at that section. The effects of the temporal series length on the statistics that describe it were specifically analyzed. As base data the temporal series starting from 1904 was used and within it the work was carried out over the last fifty years data, which is called "modern series", and in order to organize the work it was split into the following periods: 1970-2000, 1970-2010, and 1970-2016. For these series the following characteristics were calculated: media, standard deviation, variation coefficient, asymmetry coefficient, kurtosis coefficient, maximum and minimum value.*

*The descriptive statistics is the base for the statistic inference which is used to define critical design events in important waterworks like defense systems against river floods at many cities of the province in the Argentinean northeast that are located on the Paraná river banks. This works try to contribute to the discussion about the security standards of the already built constructions.*

**Keywords:** Paraná river, flows, statistics, hydraulic works.

1 Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica. Facultad Ingeniería, Universidad Nacional de Nordeste, Argentina. mgichaco@yahoo.com.ar

## 1. INTRODUCCIÓN

La sección Corrientes está ubicada frente a la ciudad homónima, en el inicio del tramo medio del río Paraná, aguas abajo de la confluencia del río Paraná Superior con el río Paraguay (figura 1). Constituye una sección de control, ya que prácticamente pasa por la misma todo el volumen escurrido sin desbordes significativo (Paoli y Schreider, 2000). Durante los años 1982 y 1983 ocurrió una importante crecida del río Paraná, la más importante del siglo veinte en esa sección, que tuvo una duración de once meses (Pilar, 2003), con caudales medios del orden de los 60,000 m<sup>3</sup>/s, superándose la marca histórica de 50,000 m<sup>3</sup>/s registrada en 1905. Según describe Paoli (1987 y Paoli y Schreider 2000), para el sistema del Paraná, las crecidas máximas registradas son el producto de un régimen complejo y en muchos casos (los más importantes) como combinación de crecidas producidas en diferentes sectores de la cuenca de aporte (cuenca Paraná Superior, aportes de la cuenca del Iguazú, aportes del río Paraguay), difícilmente separables para su análisis. También tienen influencia el estado de almacenamiento del valle al producirse la crecida, el estado de rugosidad de los cauces y del valle de inundación, lluvias locales y aportes de cursos intermedios. Las crecidas pueden ser caracterizadas a través de diferentes variables hidrológicas: (i) Caudal máximo alcanzado, (ii) Altura máxima alcanzada, (iii) Volumen escurrido para un determinado período y (iv) Duración o permanencia de determinados valores de caudales y niveles. Si bien existen relaciones entre estas variables, debido a las causas indicadas anteriormente, cada una mide características distintas del mismo fenómeno. Concretamente, en ríos de llanura, una vez desbordado el cauce principal, grandes incrementos de caudal generan variaciones de alturas no tan significativas. Por ello, desde una óptica estadística, un evento extraordinario sería “menos común” si es caracterizado por su caudal que por su altura. La variable hidrológica natural en una sección determinada de un curso de agua es su caudal, considerando a éste como resultado de todos los aportes provenientes de aguas arriba. Los niveles que alcanza el agua en la misma sección depende de la configuración

geométrica de la misma y de las características de pendiente y rugosidad del tramo aguas arriba y aguas abajo. Por otra parte, los registros hidrométricos dependerán de la localización del “cero” de la escala de medición utilizada, lo que también afectará cualquier inferencia estadística hecha sobre esa variable. Por lo expuesto, la caracterización probabilística de caudales y de niveles máximos (o críticos) en una misma sección de un río de llanura como el río Paraná, con valles de inundación amplios, no serán necesariamente correspondientes. Dicho en otras palabras, la recurrencia de un determinado evento extraordinario, será mayor si se lo analiza por su caudal que por su altura alcanzada. En numerosos trabajos de actualización de frecuencias se analiza la crecida extraordinaria de 1982/83 como un *outlier*, pues presenta una recurrencia muy superior a la extensión del registro disponible. Paoli, (1987) con base en la actualización de estudios de frecuencias de niveles máximos, muestra las limitaciones de esta variable al ser extrapolada, por lo que sugiere la utilización de series de caudales máximos para cualquier análisis probabilístico. El presente trabajo se enfoca en evaluar el comportamiento estadístico de la serie de caudales medios diarios ( $Q_{meddiario}$ ) y caudales máximos anuales ( $Q_{max1}$ ) del río Paraná en la sección Corrientes, considerando diferentes extensiones temporales. La estadística descriptiva es la base de la inferencia estadística, que se utiliza para definir eventos críticos de diseño en obras hidráulicas de importancia, como por ejemplo los sistemas de defensa contra inundaciones fluviales de varias ciudades capitales de provincia del noreste argentino, que se localizan sobre las márgenes de río Paraná. Dicho análisis será importante para verificar los estándares de seguridad de las obras ya construidas y para ayudar a las decisiones políticas y técnicas que deberían tomarse al respecto. Se analiza la denominada “serie total” 1904-2016 y también se consideraron los últimos cuarenta y seis años de datos, serie que se fraccionó en los períodos 1970-2000, 1970-2010 y 1970-2016, buscando evaluar si las estadísticas descriptiva se mantuvieron constantes o si presentaron variaciones significativas.

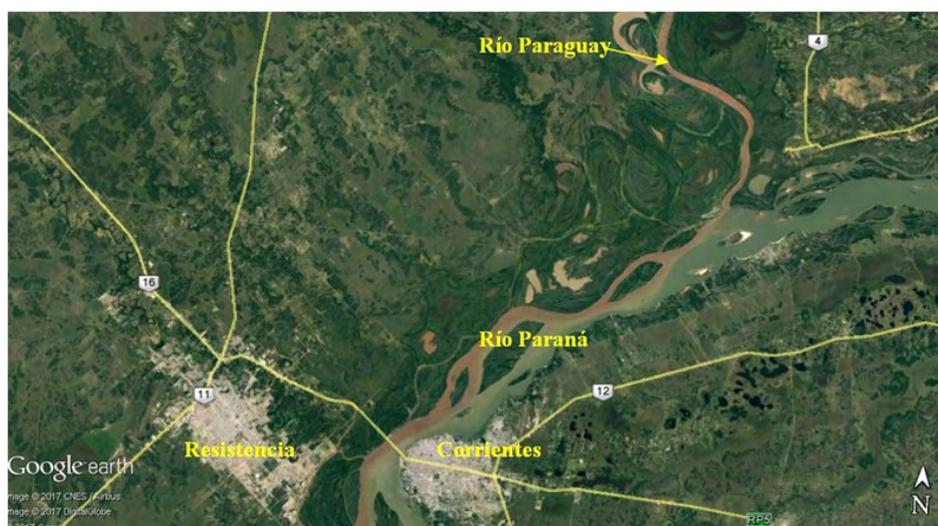


Figura1. Ubicación de la estación Corrientes (Fuente: Google Earth).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Zona de estudio

Existen numerosos trabajos referidos al estudio de las crecidas del río Paraná y al análisis de frecuencia de las mismas. Una de los primeros data de 1906 (Walquist, 1906) y se refiere a la crecida de 1905. En el mismo se comparan las oscilaciones de nivel en Asunción (río Paraguay), Posadas, Corrientes, La Paz, Paraná y Baradero, indicando además el área de afectación a lo largo de todo el valle del río Paraná hasta la ciudad de Santa Fe. Paoli y Schreider (2000) menciona que hasta el año 1977 se publicaron numerosos informes sobre el régimen de crecidas de los ríos Paraná y Paraguay, principalmente por parte de organismos estatales, como la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCPVN), del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de Agua y Energía Eléctrica (AyEE), la Comisión Nacional de la Cuenca del Plata (CONCAP) y el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH). Existen también otros informes elaborados por consultoras internacionales, que estuvieron orientados al aprovechamiento hidroeléctrico y de navegación del río Paraná, como los de Harza y Asociados, IECO/ELC, Lahmeyer Harza y Asociados, entre otros. En 1979 culminó un trabajo encargado por la Entidad Binacional Yacyretá a la firma Motor Columbus y Asociados, denominado “Estudio de

Crecidas Ríos Paraná y Paraguay”, que constituye uno de los más completos análisis realizados hasta ese momento, que incluye e integra gran parte de los informes y estudios anteriores a esa fecha. Constituye además un hito fundamental en la recopilación y manejo de información que hasta entonces se encontraba dispersa y de difícil acceso. Luego de producirse la mayor crecida del siglo XX en 1982/83, se efectuaron numerosos estudios y análisis por parte de organismos públicos y privados, destacándose, por ser de los primeros, el de Aisiks (1984) que concluye en su trabajo que si bien la crecida de 1983 tuvo un volumen y una duración excepcional, los niveles y caudales registrados no pueden ser considerados realmente excepcionales ya que su recurrencia apenas supera los cien años, a pesar de ser la mayor crecida de ese siglo. Posteriormente, Ceirano (1985) demuestra en su trabajo que esa crecida de 1982/83, con caudales estimados del orden de  $60,000 \text{ m}^3/\text{s}$  en Corrientes y Santa Fe Paraná (Entre Ríos), produjo una serie de modificaciones en los valores de los parámetros estadísticos y, como consecuencia, también en las recurrencias. Estas modificaciones se produjeron no sólo por la aparición de un valor de esta magnitud, sino también por los cambios que las mediciones producen sobre la extrapolación de las curvas de descarga que ha sido modificada. Como dato interesante presenta que entre el comienzo y el fin de la crecida, la sección de escurrimiento en Corrientes se

erosionó en 4,000 m<sup>2</sup>, lo que representa aproximadamente un 25% del área anterior a la creciente; además, los caudales medios diarios entre 1/7/82 y el 31/12/83 se estimaron por interpolación y no de las curvas H-Q (Paoli, y Schreider 2000). Entre los recientes se puede citar el estudio hidrológico e hidráulico para el proyecto “Estudios de Prefactibilidad y Anteproyecto Definitivo de la Interconexión Vial entre las Provincias de Corrientes y Santa

Fe”, encargado por el Consejo Federal de Inversiones C.F.I. (Huerta & Asoc., 1999), que se basó en la serie muestral completa, desde 1904 hasta 1998, y en otra más moderna correspondiente al período 1970 a 1998. El trabajo concluye con la determinación de los hidrogramas de diseño para recurrencias de 100 y 1,000 años, que presentan los siguientes valores: Q<sub>max</sub> (TR 100 años; 63,415m<sup>3</sup>/s y Q<sub>max</sub> (TR 1,000 años; 82,730m<sup>3</sup>/s).

Tabla 1. Serie de caudales diarios máximos anuales por año hidrológico

Período	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)						
1904/1905	50,043	1932/1933	25,789	1960/1961	34,724	1988/1989	28,194
1905/1906	27,849	1933/1934	14,455	1961/1962	24,545	1989/1990	23,174
1906/1907	24,855	1934/1935	24,670	1962/1963	24,438	1990/1991	43,829
1907/1908	29,360	1935/1936	33,512	1963/1964	23,538	1991/1992	54,000
1908/1909	24,624	1936/1937	26,167	1964/1965	33,833	1992/1993	30,254
1909/1910	22,853	1937/1938	27,026	1965/1966	43,829	1993/1994	31,549
1910/1911	19,864	1938/1939	21,488	1966/1967	27,233	1994/1995	35,011
1911/1912	39,036	1939/1940	31,012	1967/1968	21,322	1995/1996	26,701
1912/1913	24,809	1940/1941	25,931	1968/1969	23,538	1996/1997	41,884
1913/1914	21,098	1941/1942	26,073	1969/1970	20,180	1997/1998	48,162
1914/1915	24,670	1942/1943	23,754	1970/1971	27,175	1998/1999	38,149
1915/1916	23,890	1943/1944	20,969	1971/1972	23,747	1999/2000	17,018
1916/1917	22,898	1944/1945	21,141	1972/1973	29,880	2000/2001	27,854
1917/1918	25,227	1945/1946	33,672	1973/1974	30,405	2001/2002	25,571
1918/1919	27,752	1946/1947	29,582	1974/1975	23,433	2002/2003	24,532
1919/1920	31,088	1947/1948	22,409	1975/1976	26,599	2003/2004	24,769
1920/1921	36,045	1948/1949	21,357	1976/1977	36,717	2004/2005	26,253
1921/1922	30,480	1949/1950	26,930	1977/1978	24,924	2005/2006	25,601
1922/1923	38,081	1950/1951	33,193	1978/1979	29,805	2006/2007	29,728
1923/1924	26,452	1951/1952	26,073	1979/1980	34,075	2007/2008	20,912
1924/1925	19,363	1952/1953	20,117	1980/1981	31,012	2008/2009	22,038
1925/1926	33,353	1953/1954	30,632	1981/1982	38,805	2009/2010	31,167
1926/1927	25,367	1954/1955	26,930	1982/1983	60,215	2010/2011	29,688
1927/1928	28,919	1955/1956	29,139	1983/1984	37,291	2011/2012	25,421
1928/1929	39,123	1956/1957	28,194	1984/1985	28,338	2012/2013	33,624
1929/1930	30,104	1957/1958	32,404	1985/1986	26,943	2013/2014	33,219
1930/1931	35,962	1958/1959	33,833	1986/1987	38,861	2014/2015	30,139
1931/1932	32,091	1959/1960	23,538	1987/1988	26,943	2015/2016	36,927

## 2.2 Selección de la muestra

El análisis se hizo primeramente sobre la serie total (1904-2016), con una extensión de 112 años de registro, considerando como año hidrológico al período comprendido entre septiembre y agosto del año calendario siguiente, trabajando sobre los valores de caudales medios diarios (Q<sub>meddiario</sub>) y caudales diarios máximos

anuales (Q<sub>max</sub>). También se trabajó con la serie moderna, que abarca el período 1970-2016, la que a su vez se analizó por separado distintas extensiones de registros (1970-2000, 1970-2010 y 1970-2016). Actualmente, para los diseños de obras de ingeniería afectadas por el río Paraná, se utiliza la serie moderna pues refleja el fuerte proceso de antropización de esta región de la Cuenca del Plata durante los últimos 50 años, en

los que se construyeron numerosas presas de embalse, desaparecieron bosques nativos, entre otras intervenciones humanas. La serie de datos de Qmax estudiados se muestra en la tabla 1, en

la cual están ordenados por año hidrológico. En la figura 2 se representan en orden cronológico esos valores.

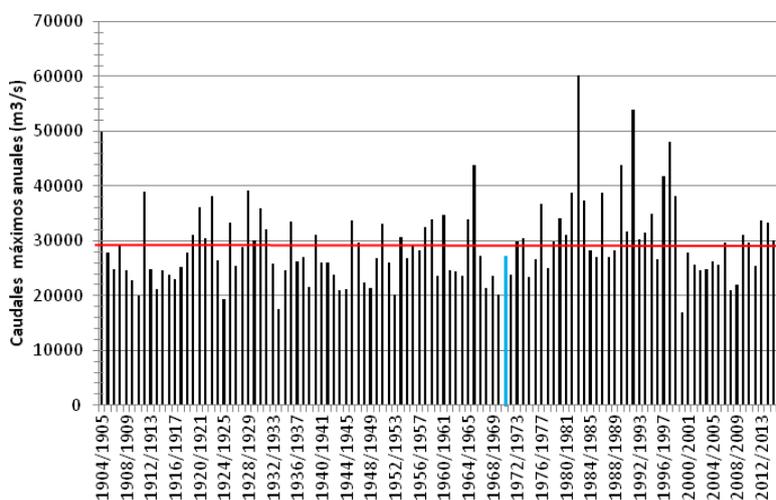


Figura 2. Río Paraná en Corrientes caudales máximos anuales. (Fuente: elaboración propia).

### 2.3 Datos atípicos

Chow *et al.*, (1994) explican que los datos dudosos (outliers) son aquellos que se alejan significativamente de la tendencia que posee la serie. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de las estadísticas de la serie, especialmente en muestras pequeñas. Para detectar la eventual presencia de outliers se usó la metodología propuesta por Naghettini y Andrade (2007), que emplea diferentes cuartiles de un conjunto de datos. Para ello se calcularon el primer cuartil (Q1), el tercer cuartil (Q3) y el rango

intercuartílico (Q3-Q1), para definir el umbral a partir del cual, si es superado, se considera al dato como outlier. Los resultados obtenidos fueron  $Q1=12,961.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q3=20,583.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q2=16,398.7 \text{ m}^3/\text{s}$  (que es la mediana de la serie) y los extremos inferior y superior,  $3,945.54 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $32,014.34 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Un total de 1,039 veces fue superado el extremo superior (sobre un total 40,880 datos diarios). En figura 3 se muestra un diagrama de caja en que se representan los cuartiles 1 y 3, la mediana y los valores atípicos como puntos por afuera de dicha caja.

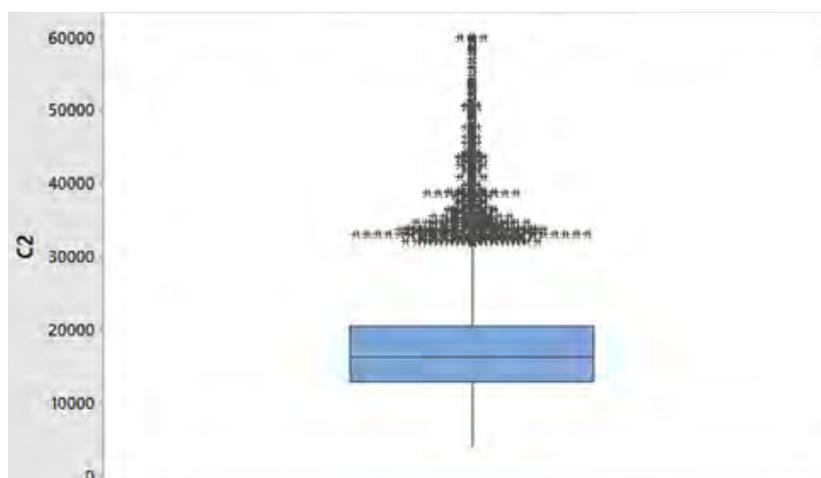


Figura3. Gráfico de caja y outliers

Si bien esos valores podrían ser considerados outliers, en su análisis se tuvo en cuenta lo indicado por Paoli *et al.*, (1991), que dice “la crecida extraordinaria del año 1982-83, indudablemente tiene características de evento raro, que se conoce como outliers, que cambia significativamente las propiedades estadísticas de datos originales (coeficiente de asimetría y cuantiles)”. En este caso, los valores atípicos presente en la serie provienen de la variabilidad natural propia de las variables hidrológicas que caracterizan los eventos de cierta magnitud que se producen en este tipo de ríos. Por lo tanto sí

fueron considerado en el análisis (no fueron descartados).

### 3. RESULTADOS

Las estadísticas calculadas para las series de caudales medios diarios ( $Q_{meddiario}$ ) y máximos diarios anuales ( $Q_{max}$ ) son presentados en las tablas 2 y 3.

La tabla 4 muestra las series móviles para 50 años.

Tabla 2. Estadística descriptiva de la serie de caudales medio diarios

Período	1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Media	17 282.00	19 475.81	18 989.74	19 097.38
Mediana	16 398.70	17 946.90	17 523.30	17 691.80
Moda	15 072.60	17 861.60	17 861.60	17 861.60
Desviación estándar	6 409.55	7 115.70	6 519.89	6 338.49
Varianza de la muestra	41 082 363.67	50 633 205.66	42 508 949.38	40 176 490.27
Curtosis (CK)	2.93	4.42	5.53	5.46
Coef. de asimetría (CS)	1.14	1.70	1.86	1.83
Rango	56 269.40	53 785.10	53 785.10	53 785.10
Mínimo	3 945.60	6 429.90	6 429.90	6 429.90
Máximo	60 215.00	60 215.00	60 215.00	60 215.00
Suma	710 912 544.45	213 084 849.38	277 136 244.80	320 568 566.75
Cuenta (N)	41 136	10 941	14 594	16 786
Mayor (1)	60 215.00	60 215.00	60 215.00	60 215.00
Menor(1)	3 945.60	6 429.90	6 429.90	6 429.90
Nivel de confianza (95%)	61.94	133.35	105.79	95.89
Coef. de Variación (CV)	0.37	0.37	0.34	0.33

Tabla 3. Estadística descriptiva de los caudales máximo diario anual

Período	1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Media	29 222.88	33 103.12	31 287.97	31 316.02
Mediana	27 492.50	30 329.45	29 033.04	29 766.74
Moda	23 538.00	26 943.20	26 943.20	26 943.20
Desviación estándar	7 383.64	9 481.01	8 903.50	8 394.27
Varianza de la muestra	54 518 087.67	89 889 613.33	79 272 261.12	70 463 812.50
Curtosis (CK)	3.17	1.45	2.36	2.80
Coef. de asimetría (CS)	1.40	1.13	1.43	1.46
Rango	45 760.00	43 196.65	43 196.65	43 196.65
Mínimo	14 455.00	17 018.35	17 018.35	17 018.35
Máximo	60 215.00	60 215.00	60 215.00	60 215.00
Suma	3 272 962.70	993 093.61	1 251 518.61	1 440 536.70
Cuenta (N)	112	30	40	46
Mayor (1)	60 215.00	60 215.00	60 215.00	60 215.00
Menor(1)	14 455.00	17 018.35	17 018.35	17 018.35
Nivel de confianza (95%)	1 382.52	3 540.27	2 847.48	2 492.79
Coef. de Variación (CV)	0.25	0.29	0.28	0.27

Tabla 4. Series móviles de 50 años

Período	Media	Desvío	Coef. Asimetría	Coef. Variación	Coef. Kurtosis
1904/1905 - 1953/1954	27624.16	6322.726	1.004	0.229	3.170
1905/1906 - 1954/1955	27161.90	5432.442	0.355	0.200	3.576
1906/1907 - 1955/1956	27187.70	5438.831	0.340	0.200	3.512
1907/1908 - 1956/1957	27254.48	5430.097	0.305	0.199	3.464
1908/1909 - 1957/1958	27315.36	5471.094	0.280	0.200	3.408
1909/1910 - 1958/1959	27499.54	5533.296	0.203	0.201	3.362
1910/1911 - 1959/1960	27513.24	5522.394	0.202	0.201	3.344
1911/1912 - 1960/1961	27810.44	5502.157	0.140	0.198	3.394
1912/1913 - 1961/1962	27520.62	5275.787	0.121	0.192	3.608
1913/1914 - 1962/1963	27513.20	5279.938	0.124	0.192	3.558
1914/1915 - 1963/1964	27562.00	5230.480	0.128	0.190	3.582
1915/1916 - 1964/1965	27745.26	5287.298	0.054	0.191	3.535
1916/1917 - 1965/1966	28144.04	5724.443	0.303	0.203	3.501
1917/1918 - 1966/1967	28230.74	5675.990	0.280	0.201	3.488
1918/1919 - 1967/1968	28152.64	5744.615	0.278	0.204	3.435
1919/1920 - 1968/1969	28068.36	5781.407	0.308	0.206	3.365
1920/1921 - 1969/1970	27850.20	5870.259	0.356	0.211	3.319
1921/1922 - 1970/1971	27672.79	5750.359	0.413	0.208	3.408
1922/1923 - 1971/1972	27538.14	5762.102	0.475	0.209	3.353
1923/1924 - 1972/1973	27374.11	5569.368	0.475	0.203	3.532
1924/1925 - 1973/1974	27453.17	5584.048	0.430	0.203	3.460
1925/1926 - 1974/1975	27534.58	5492.621	0.466	0.199	3.533
1926/1927 - 1975/1976	27399.49	5429.294	0.534	0.198	3.537
1927/1928 - 1976/1977	27626.48	5577.806	0.465	0.202	3.474
1928/1929 - 1977/1978	27546.59	5587.515	0.505	0.203	3.399
1929/1930 - 1978/1979	27360.23	5343.598	0.471	0.195	3.637
1930/1931 - 1979/1980	27439.64	5414.242	0.445	0.197	3.571
1931/1932 - 1980/1981	27340.64	5299.263	0.451	0.194	3.675
1932/1933 - 1981/1982	27474.92	5503.230	0.505	0.200	3.648
1933/1934 - 1982/1983	28163.44	7184.676	1.938	0.255	3.571
1934/1935 - 1983/1984	28620.16	7019.390	2.080	0.245	3.790
1935/1936 - 1984/1985	28693.52	6996.394	2.072	0.244	3.726
1936/1937 - 1985/1986	28562.14	6965.673	2.151	0.244	3.737
1937/1938 - 1986/1987	28816.03	7106.511	1.979	0.247	3.652
1938/1939 - 1987/1988	28814.37	7106.947	1.980	0.247	3.561
1939/1940 - 1988/1989	28948.49	7028.711	2.011	0.243	3.570
1940/1941 - 1989/1990	28791.73	7069.037	2.034	0.246	3.508
1941/1942 - 1990/1991	29149.70	7368.069	1.826	0.253	3.424
1942/1943 - 1991/1992	29708.24	8147.376	1.740	0.274	3.340
1943/1944 - 1992/1993	29838.24	8102.162	1.728	0.272	3.292
1944/1945 - 1993/1994	30049.84	8003.356	1.739	0.266	3.320
1945/1946 - 1994/1995	30327.23	7928.284	1.715	0.261	3.347
1946/1947 - 1995/1996	30187.82	7929.555	1.766	0.263	3.343
1947/1948 - 1996/1997	30433.86	8099.421	1.626	0.266	3.250
1948/1949 - 1997/1998	30948.92	8392.233	1.489	0.271	3.239
1949/1950 - 1998/1999	31284.77	8336.359	1.439	0.266	3.262
1950/1951 - 1999/2000	31086.53	8556.954	1.307	0.275	3.166
1951/1952 - 2000/2001	30979.75	8563.441	1.342	0.276	3.137
1952/1953 - 2001/2002	30969.71	8569.602	1.341	0.277	3.048
1953/1954 - 2002/2003	31058.01	8477.748	1.388	0.273	3.115
1954/1955 - 2003/2004	30940.74	8524.188	1.400	0.276	3.022
1955/1956 - 2004/2005	30927.21	8531.218	1.400	0.276	2.923
1956/1957 - 2005/2006	30856.45	8560.973	1.406	0.277	2.817

1957/1958 - 2006/2007	30887.14	8553.982	1.399	0.277	2.711
1958/1959 - 2007/2008	30657.30	8666.045	1.396	0.283	2.649
1959/1960 - 2008/2009	30421.40	8738.075	1.425	0.287	2.628
1960/1961 - 2009/2010	30573.97	8681.853	1.408	0.284	2.581
1961/1962 - 2010/2011	30473.26	8661.913	1.452	0.284	2.588
1962/1963 - 2011/2012	30490.77	8650.560	1.454	0.284	2.516
1963/1964 - 2012/2013	30674.49	8616.866	1.413	0.281	2.448
1964/1965 - 2013/2014	30868.10	8561.825	1.382	0.277	2.403
1965/1966 - 2014/2015	30794.23	8551.651	1.413	0.278	2.367
1966/1967 - 2015/2016	30656.19	8391.156	1.476	0.274	2.878

#### 4. DISCUSIÓN

Estadísticas de tendencia central: se nota un crecimiento de estas estadísticas al comparar la serie total (1904-2016) con la moderna total (1970-2016) y sus fracciones. En la tabla 5 se presentan dichas variaciones tomando las estadísticas de la serie total como base “1”. Estadísticas de variabilidad: el desvío estándar y los valores mínimos mostraron un crecimiento al comparar las series modernas con la serie total, mientras que el rango disminuyó y el valor máximo se mantuvo igual (que corresponde a la mayor creciente registrada en el año 1982/83); el

coeficiente de variación tampoco mostró variaciones significativas. En la tabla 6 se presentan dichas variaciones tomando como base de comparación “1” las estadísticas de la serie total. El crecimiento de los valores de estadísticas de tendencia central y del desvío estándar estarían indicando que los eventos críticos de diseño deberían ser recalculados, teniendo en cuenta la ecuación generalizada de frecuencia de Chow (Chow *et al.*, 1994; Tucci, 1997 ), utilizada en diseños hidrológicos e hidráulicos, y que indica lo siguiente:

$$\hat{X} = \bar{X} + \sigma k \quad (1)$$

Donde:  $\hat{X}$  es el valor crítico de la variable hidrológica;  $\bar{X}$  es el valor medio

$\sigma$  es la desviación estándar de la muestra y  $k$  es el factor de frecuencia del evento crítico

Tabla 5. Variaciones de estadísticas de tendencia central

		1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Qmeddiario	Media	1	1.127	1.099	1.105
	Mediana	1	1.094	1.069	1.079
	Moda	1	1.185	1.185	1.185
Qmax	Media	1	1.133	1.071	1.072
	Mediana	1	1.103	1.056	1.083
	Moda	1	1.145	1.145	1.145

Tabla 6. Variaciones de estadísticas de variabilidad

		1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Qmeddiario	Desvío estándar	1	1.110	1.017	0.989
	Rango	1	0.956	0.956	0.956
	Mínimo	1	1.630	1.630	1.630
	Máximo	1	1.000	1.000	1.000
Qmax	Desvío estándar	1	1.284	1.206	1.137
	Rango	1	0.944	0.944	0.944
	Mínimo	1	1.177	1.177	1.177
	Máximo	1	1.000	1.000	1.000

## 5. CONCLUSIONES

Los análisis de frecuencia de crecidas deben ser permanentemente actualizados cuando se dispone de nuevos registros. Del análisis de series móviles (tabla 4), el coeficiente de asimetría muestra variaciones muy marcadas: por ejemplo, el del período 1904-1905 1953-1954 (50 años) es 1.004, pues incluye en su extremo (1904-1905) el tercer máximo caudal registrado. Después de la crecida de 1982/1983 se registraron otras crecidas importantes (años 1988, 1992 y 1998), que elevan el valor de la media, pero no modifican la variabilidad de la serie. Se observa en los últimos años una mayor frecuencia de valores cercanos y superiores a 40,000 m<sup>3</sup>/s y además llama la atención la

sucesión de eventos extraordinarios que alcanzaron o estuvieron en el orden de 50,000 m<sup>3</sup>/s (1983, 1992 y 1998). Esas variaciones estadísticas serían producto del cambio de uso del suelo en la cuenca y del efecto hidrológico de las presas construidas en los últimos cincuenta años, pudiendo influir también las manifestaciones del cambio climático. Para el proyecto de futuras obras hidráulicas sería deseable definir cuál sería la serie moderna a emplear para los eventos críticos de diseño. Se aclara que el presente trabajo se enfocó en el análisis de estadísticas descriptivas y no estuvo orientado a asignar recurrencias a los máximos caudales observados, según la secuencia temporal de las series consideradas.

## REFERENCIAS

- Aisikis, E. (1984). *La gran crecida del río Paraná de 1983*. TECHINT Boletín informativo no. 232. Buenos Aires, Argentina.
- Ceirano, E. (1985). *Evaluación de la crecida de 1982-83 del río Paraná y su influencia sobre la estimación estadística de caudales máximos*. AyEE
- Chow, V., Maidment, D. Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Mc Graw-Hill. Santa Fe de Bogotá. Colombia.
- Huerta & Asoc. (1999). *Estudios de Prefactibilidad y Anteproyecto Definitivo de la Interconexión Vial entre las Provincias de Corrientes y Santa Fe*. Consejo Federal de Inversiones (C.F.I.) 09/08/2019 <http://biblioteca.cfi.org.ar/biblioteca>. Argentina
- Naghetini, M.; Andrade E. (2007). *Hidrología estadística*. Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte.
- Paoli, C. (1987). *Control y protección de crecidas. Análisis probabilístico y perfiles de niveles máximos*. INCYTH. MOSP. Buenos Aires
- Paoli, C., Cacik, P., Bolzicco, J. (1991). *Análisis de frecuencia de crecidas del río Paraná*. Convenio Agua y Energía. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Publicación FICH-UNL. Santa Fe.
- Paoli, C., Schreider, M. (2000). *El río Paraná en su tramo medio*. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe.
- Pilar, J. (2003). *Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para a otimização de traçados de obras de engenharia civil: O caso do sistema de defesa contra inundações da cidade de Resistencia, Argentina*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre.
- Tucci, C. (1997). *Hidrología ciência e aplicação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Walqhist, O. (1906). *La Gran Creciente de 1905 del río Paraná y sus afluentes*. Oficina Meteorológica Argentina. Buenos Aires.

*Como citar este artículo:*

Gómez, M., Pilar, J., Ruberto, A., Depettris, C., Méndez, G. (2019). Verificación de la estabilidad estadística de la serie de caudales del río Paraná en la sección Corrientes. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 50-58. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-05

## Dinámica de la contribución glaciar a la cuenca alta del río Yeso durante el periodo de ablación 2017/2018

*Dynamics of the glacial contribution to the upper Yeso river basin during the period of ablation 2017/2018*

Quevedo-Tejada, D.<sup>1\*</sup>, Landeros, E.<sup>1</sup>, Olivares, D.<sup>1</sup>, McPhee, J.<sup>2</sup>, Caro, A.<sup>2</sup>, Berroeta, C.<sup>3</sup>, Poblete, C.<sup>3</sup>, Reyes, J.<sup>3</sup>, Fleege, H.<sup>4</sup>, Carvallo, J.<sup>5</sup>, Fuentes, J.<sup>4</sup>

\*Autor de correspondencia

Recibido: 15/08/2019

Aceptado: 19/09/2019



### Resumen

El abastecimiento de agua potable es uno de los mayores desafíos que presentan las ciudades en el mundo. Si bien en Chile se ha logrado una cobertura de agua potable urbana del 100%, la garantía del suministro futuro requiere estudios constantes del estado y evolución de las distintas fuentes de abastecimiento. En el caso de Santiago, el abastecimiento de agua depende principalmente de la cuenca alta del río Maipo y la existencia de más de 700 glaciares, lo que hace necesario entender de mejor manera los procesos hidrológicos y considerar los efectos del cambio climático sobre la cuenca. En particular, los aportes glaciares a la hidrología a nivel de cuenca son poco conocidos, a pesar de representar un almacenamiento natural de agua que contribuye a la demanda en los meses de máximo consumo. En este contexto, este trabajo se orientó al estudio de cuatro glaciares de diferente tipo (descubiertos, cubiertos y rocoso) durante el período de ablación 2017-2018, realizando mediciones de variables meteorológicas, hidrológicas y glaciológicas relevantes en la cuenca alta del río Yeso, donde se ubica el embalse El Yeso, principal fuente reguladora de almacenamiento para el abastecimiento. Los principales resultados cuantifican el aporte glaciar durante el período de deshielo, en un 41%, donde el glaciar cubierto Pirámide aportó cerca del 56% del total del aporte glaciar. Estos resultados fueron confirmados y complementados por el análisis fluviométrico e isotópico, indicando que entre el 20 y 60% del aporte proviene de aguas con interacción con unidades geológicas, es decir, los glaciares rocosos o cubiertos, las cuales infiltran y luego afloran aguas abajo. Los resultados muestran la diferencia en la dinámica del aporte glaciar según su tipología, así como también su rol de embalse natural, proveyendo de agua durante toda la etapa de ablación, durante el período de máxima demanda para el consumo humano y agrícola.

**Palabras clave:** oferta hídrica, aporte escorrentía glaciar, río Yeso.

### Abstract

*The supply of drinking water is one of the greatest challenges for cities in the world. Although Chile has accomplished the goal of 100% urban drinking water coverage, to ensure future supply requires a continuous updating of knowledge about the actual and future situation of water supply sources. In Santiago, water supply depends mainly on the Upper Maipo River Basin and its more than 700 glaciers. This context makes it necessary for a better understanding of hydrological processes and impacts of Climate Change on the basin. In particular, glacial contribution to hydrology at the basin level are less known than other contributions, besides it represents a natural reservoir that supply water in the months of greatest demand. In this context, this study was focused on the analysis of four glaciers of different types (uncovered, covered and rock glaciers) during the period of ablation 2017-2018, measuring relevant meteorological, hydrological and glaciological variables in the Upper Yeso river Basin, where is located the El Yeso reservoir, the main source of storage for supply. The results obtained in the study allows to estimate the glacier contribution among the melting season, during the observed period around 41% of the streamflow comes from ice melting, and the largest contributor was glacier Piramide (nearly 56% of the total glacier contribution). These results were confirmed and complemented by fluviometric and isotopic analysis, which indicated among 20 and 60% of streamflow correspond to sources with interaction with geological units, related to rock or debris covered glaciers. The results show the difference of glacier contribution according to its typology, as well as its role as a natural reservoir, providing water during the entire melting season, coincident with the maximum water demand for human and agricultural uses.*

**Keywords:** water supply, glacial runoff contribution, Yeso River.

1 Corporación Chilena de Investigación del Agua, Santiago-Chile, diana.quevedo@cetaqua.com, elanderos@cetaqua.com, dolivaresme@cetaqua.com

2 Universidad de Chile, Fundación para la Transferencia Tecnológica, jmcphoe@u.uchile.cl, alexis.caro@amtc.cl

3 Aguas Andinas, Dirección Desarrollo Sustentable, y Dirección de Gestión del Servicio, cberroeta@aguasandinas.cl, cpoblete@aguasandinas.cl, jreyesa@aguasandinas.cl

4 Sociedad del Canal de Maipo, jfuentes@scmaipo.cl

5 Junta de Vigilancia de la 1ª Sección del Río Maipo, harryfleege@hotmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable de la población es uno de los mayores desafíos que presentan las ciudades en el mundo, lo que ha motivado a las Naciones Unidas a considerarlo como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS5). Si bien Chile ha logrado una cobertura de agua potable urbana del 100%, la garantía del suministro a medio y largo plazo requiere un estudio constante del comportamiento actual y futuro de las distintas fuentes de abastecimiento.

En el caso de Santiago de Chile, con una población de más de 7 millones de habitantes y cuyo abastecimiento de agua depende principalmente de la cuenca alta del Río Maipo, se hace necesario entender de mejor manera los ciclos hidrológicos y considerar los potenciales impactos del cambio climático sobre la cuenca.

Dentro de las características relevantes de la cuenca se encuentra la existencia de 768 glaciares, de acuerdo al catastro vigente de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, cuya dinámica de aporte glaciar a la hidrología a nivel de cuenca es poco conocida, y que representa un almacenamiento natural de agua que precisamente contribuye a suplir la demanda en los meses de máximo consumo, entre diciembre a marzo.

A nivel global, cerca de 500 glaciares en diversas regiones del mundo han sido monitoreados desde 1894 (WGMS, 2008), transformándose en objeto de estudio en la medida que sus retrocesos generan impactos severos a nivel ambiental y humano, principalmente en su rol de prestadores de servicios ecosistémicos y reservorios de agua para abastecimiento humano. Como resultado del análisis de estas mediciones, se ha observado que la tasa de derretimiento glaciar a nivel mundial y en particular en la cordillera de Los Andes ha incrementado considerablemente desde 1960 (Vaughan *et al.*, 2013), evidenciándose tasas de retroceso anual de longitud glaciar de hasta 125 m entre 1961 y 2011 (Rivera *et al.*, 2012). Estas tasas de derretimiento han impactado directamente en la hidrología glaciar, alterando la temporalidad y magnitud de los

caudales y perdiendo su capacidad de almacenamiento de agua.

Así mismo, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático en su Quinto Reporte (AR5) ha puesto de manifiesto en sus proyecciones de los escenarios RCP 2.6 y 8.5 en la zona central de Chile (2081-2100), aumentos de temperatura entre 0.5 y 1.5°C, con reducciones en la precipitación promedio anual entre un 5 y 15%, incremento de la elevación de la isoterma 0°C con la consiguiente reducción de los caudales medios mensuales provenientes de glaciar (Vaughan *et al.*, 2013).

En la actualidad, la Dirección General de Aguas del Gobierno de Chile, DGA, advierte que la supervivencia de glaciares pequeños está en riesgo, ya que, de mantenerse el aumento de temperatura y el descenso de precipitación, estos desaparecerían en el corto plazo, es decir entre 15 y 20 años (Nota de prensa, El Mercurio 12/mayo/2019).

### 1.1 Inventarios de glaciares en Chile

Actualmente, la DGA, trabaja en la actualización del inventario de glaciares para todo el país. A nivel de la cuenca del río Maipo, la DGA ha llevado a cabo dos inventarios de glaciares con el objetivo de levantar información sobre las principales características físicas de los glaciares. El primer inventario, desarrollado por Cedomir Marangunić en 1979, se focalizó en la cuenca del río Maipo, empleando como información base fotografías aéreas del vuelo HYCON (1955-56) complementadas por la cartografía desarrollada por Louis Lliboutry en 1956, y fotografías recientes de excursiones a altas cumbres (DGA, 1979). El segundo inventario de glaciares desarrollado por DGA en 2011, contempló como área de estudio la zona central de Chile. En su desarrollo se utilizaron imágenes satelitales del sensor ETM+ de los años 2000 y 2001, imágenes Spot 5 extraídas de la aplicación Arc2Earth, fotografías aéreas SAF 1:50.000 de 1996-2002 y un modelo digital de elevación ASTER GDEM (DGA, 2011a; 2011b). En este sentido, ambos catastros presentan un gran desfase entre la información base empleada para su análisis y su fecha de publicación; así mismo, presentan diferencias en el tipo de información empleada y las metodologías de

procesamiento, con lo cual su comparación debe hacerse teniendo en cuenta dichos aspectos. En la tabla 1, se presenta un resumen comparativo entre los inventarios de 1979 y 2011 para la cuenca del río Maipo. Respecto del número total de glaciares, el catastro de 1979 contabilizó un total de 647 glaciares, mientras que en 2011 este número ascendió a 768, principalmente con las mejoras en la identificación de los glaciares rocosos cuyo número pasó de 326 en 1979 a 538 en 2011. El área glaciar total estimada

disminuyó de 421.9 km<sup>2</sup> en 1979 a 372.72 km<sup>2</sup> en 2011; esta diferencia puede atribuirse principalmente a la información fuente empleada y a los métodos de estimación. Un aspecto importante objeto de estudio, ha sido la cuantificación del aporte glaciar a la escorrentía del río Maipo, lo cual resulta indispensable al momento de analizar la disponibilidad actual y proyectada de los recursos hídricos afluentes a la ciudad de Santiago, especialmente para consumo humano.

Tabla 1. Cuadro comparativo entre los inventarios de glaciares de 1979 y 2011 para la cuenca del río Maipo. Fuente: adaptado DGA (2011a; 2011b).

Inventario	Total glaciares	Nº glaciares rocosos	Área total km <sup>2</sup>	Área glaciar descubierto km <sup>2</sup>	Área glaciares cubiertos y rocosos km <sup>2</sup>	Elevación mínima msnm	Elevación máxima msnm
1979	647	326	421.9	257.1	164.7	3,730	4,203
2011	768	538	372.72*	204.5	Cubierto = 26.2 Rocoso = 142.02	3,646	4,031

\*El valor de área total glaciar para el inventario de 2011 registrado en el Informe técnico DGA (2011a) es de 371.24 km<sup>2</sup>, mientras que el cuantificado a partir de los datos brutos contenidos en los Anexos (DGA, 2011b) del mismo estudio es de 372.72 km<sup>2</sup>. Esta diferencia puede deberse al proceso de digitación y redondeo de los datos.

Además de su magnitud, ha resultado interesante su variación según el tipo de año hidrológico (Muy húmedo, húmedo, normal, seco, muy seco). De acuerdo con Castillo (2015) en años secos el caudal proveniente del derretimiento de glaciares puede constituir hasta un 81% del caudal total de verano, un 44% y un 21% del caudal total en años secos y húmedos respectivamente. Mientras que Ayala *et al.*, (2016) concluyó que durante años secos la contribución glaciar a la escorrentía corresponde

a un 42+/-8% y 67+/-6% del caudal anual y el de verano respectivamente. Por su parte, Peña y Nazarala (1987) indican que en el año hidrológico más seco registrado en la cuenca (1968/69), el aporte glaciar de acuerdo a su metodología fue aproximadamente del 67% de la descarga mensual registrada en este verano, mientras que para el período 1985/86 que fue un año seco, este aporte es tan solo de 24.3% (tabla 2).

Tabla 2. Aporte glaciar al caudal promedio anual y caudal promedio de verano estimado por Peña y Nazarala (1987), Castillo (2015) y Ayala *et al.*, (2016).

Estudio	Estación	Tipo año hidrológico	Periodo	Aporte en verano (%)	Aporte en anual (%)
Peña & Nazarala (1987)	Río Maipo en El Manzano	Normal	1984/85	11,3	6,8
		Seco	1985/86	24,3	16,8
Castillo (2015)	Río Maipo en El Manzano	Normal		42	25
		Seco	1984/15	48	27
		Muy seco		81	45
Ayala <i>et al.</i> (2016)	AWS en cuenca río Yeso	Normal	2013/14	30	10
		Muy seco	2014/15	67	42

Lo anterior, marca una fuerte dependencia del aporte glaciar en función del año hidrológico. Situación a tener en cuenta, si se considera el hecho de que a 2018, cerca del 90% de la población de la ciudad de Santiago se abastece de agua potable de la cuenca alta del río Maipo (estimaciones propias), contando para esto con reservas hídricas como el Embalse El Yeso (220 millones m<sup>3</sup>), principal almacenamiento regulado de la cuenca para consumo humano y agrícola, además de la laguna Negra (600 millones m<sup>3</sup>) y la laguna Lo Encañado (50 millones m<sup>3</sup>), ubicadas en la cuenca alta del río Yeso, afluente del río Maipo. En la cuenca del río Yeso, con un área de 627 km<sup>2</sup>, se encuentran cerca de 94 glaciares de los cuales 63 son rocosos y 16 son descubiertos, los cuales representan un 6.2% del área total de la cuenca del río Yeso y el 12% del total de glaciares presentes en la cuenca alta del río Maipo (Aguas Andinas, 2018).

Bajo este contexto de cambios de la disponibilidad hídrica debido a futuras y actuales alteraciones en la precipitación y la temperatura en términos de cantidad, calidad y temporalidad, la creciente necesidad de garantizar la Seguridad Hídrica en diversos ámbitos, entre ellos el acceso oportuno y permanente a agua potable, y su dependencia de los glaciares como fuente de suministro, es relevante profundizar en el conocimiento de la dinámica del aporte glaciar actual y futura como una herramienta para desarrollar estrategias de gestión del recurso hídricos y establecimiento de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático que aseguren el abastecimiento de la demanda en un contexto de sostenibilidad.

En este sentido, el presente documento tiene como objetivo evaluar la dinámica de la escorrentía proveniente de glaciares en la cuenca alta del río Yeso para el periodo de ablación 2017/18, mediante el análisis de datos tomados en terreno y la modelación hidroglaciológica.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### *2.1 Área de estudio*

La cuenca alta río Yeso se localiza en el sector oriente de la cuenca alta del río Maipo, aguas arriba del embalse El Yeso, donde el nacimiento

del río principal es producto del derretimiento glaciar de la cuenca alta, definiéndose de forma más clara como curso fluvial en el sector Termas del Plomo TP (-33,56°N -69,91°O), donde convergen los caudales de deshielo de los glaciares Bello, Yeso y Pirámide. En el sector de Termas del Plomo se considerará el cierre de la cuenca en estudio (figura 1).

La cuenca del río Yeso en TP posee una extensión de alrededor 59.9 km<sup>2</sup>, con un rango de elevación aproximado entre los 3,015-5,500 msnm. El número total de glaciares contenidos en esta cuenca es de 10, donde los dos glaciares descubiertos, denominados glaciar Bello (4.1 km<sup>2</sup>) y Yeso (2.2 km<sup>2</sup>), el glaciar cubierto por detritos, glaciar Pirámide (4.4 km<sup>2</sup>), y un glaciar rocoso denominado D-073 (0.41 km<sup>2</sup>) serán objeto de estudio y monitoreo.

La cuenca alta del río Yeso presenta régimen nival, con los mayores caudales en los meses de diciembre y enero provenientes del derretimiento de nieve (figura 2).

### *2.2 Información disponible*

Los datos empleados en la modelación, provienen de la campaña de terreno realizada durante el periodo de ablación 09-2017/05-2018. Esta campaña de terreno consideró mediciones de variables hidroglaciológicas de forma continua (escala 10-minutal) y discreta, implicando visitas mensuales a la zona de estudio para el rescate de información y toma de datos y muestras puntuales.

De cara a la medición continua de caudales provenientes de los glaciares, se instaló una estación fluviométrica en cada uno de los siguientes puntos: al cierre de la cuenca El Yeso en el sector Termas del Plomo (F\_TP), en los frentes de los glaciares Bello (F\_B) y Yeso (F\_Y), en el cierre de la cuenca correspondiente a estos dos glaciares (F\_BY) a 2 km del cierre de F\_TP y en del río Yeso con el glaciar Pirámide (F\_AP) a 0.3 km de F\_TP. La estación F\_AP se instala en el cierre de la subcuenca Bello-Yeso, dado que la cuenca del glaciar Pirámide no contaba con un único punto de salida; de esta forma por diferencia de los caudales medidos en F\_TP y FA\_P, fue posible estimar el aporte desde el glaciar Pirámide. Todas las estaciones fluviométricas, registraron cada 10 minutos

variables como: columna de agua, presión de agua y de aire, así como temperatura del agua y del aire y conductividad eléctrica. Las estaciones meteorológicas se instalaron sobre los mismos glaciares, con un total de cuatro estaciones AWS\_Y sobre el glaciar Yeso, AWS\_B sobre el glaciar Bello, AWS\_P y AWS\_D073 sobre los glaciares Pirámide y D-073, respectivamente. Cada AWS midió once variables asociadas a las cuatro componentes de la radiación, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y altura de nieve (excepto para los glaciares Pirámide y D073). Los puntos de instalación de las estaciones AWS obedecieron a criterios técnicos, y de acceso y seguridad del equipo humano. De cara a la estimación del balance de masa glaciar mediante el Método Geodésico, se realizaron 3 campañas de medición con TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) en octubre y

diciembre de 2017 y marzo de 2018, con un total de 22 levantamientos que abarcaron los glaciares Bello (9 levantamientos), el glaciar Yeso (9 levantamientos), el glaciar Pirámide (7 levantamientos). El número de levantamientos por campaña y por glaciar buscaba mapear la mayor extensión posible de cada uno de estos, tomando las imágenes desde lugares fijos de fácil acceso por parte del equipo humano.

Finalmente, se recolectaron a escala mensual, muestras de agua, nieve y hielo, con el objetivo de realizar análisis isotópico y químico para estimar de manera complementaria los aportes de diferentes fuentes, agua, hielo y nieve, a la escorrentía medida en la cuenca estudiada. Durante las campañas de terreno se tomaron muestras tanto en el cauce principal como en los distintos tributarios. En total se analizaron isótopos en 194 muestras y química 129.

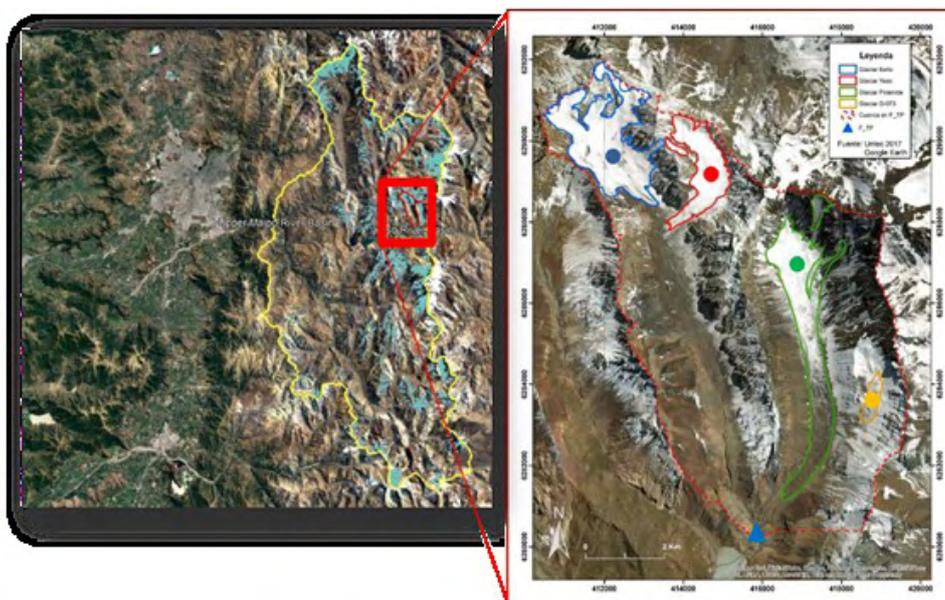


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

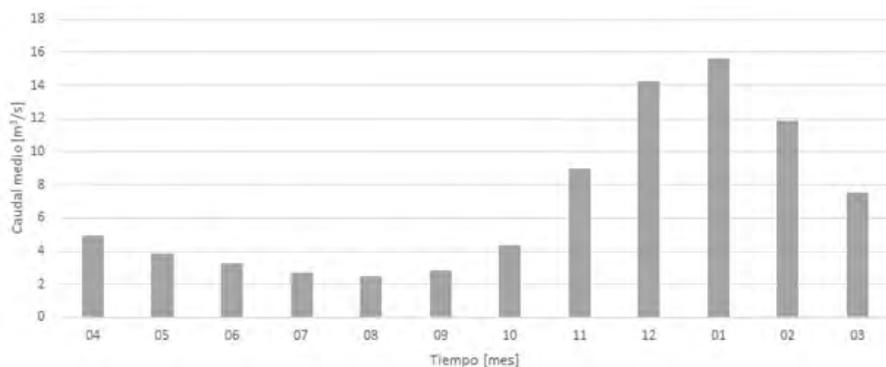


Figura 2. Régimen hidrológico de la cuenca alta del río Yeso. Fuente: datos proporcionados por Aguas Andinas.

### 2.3 Balance de masa

El balance de masa de un glaciar evalúa el cambio de masa por una unidad de tiempo como consecuencia de forzantes atmosféricas. En el caso de estudio, se empleó el Método Geodésico, donde el balance se estimó a partir de la diferencia de elevación de la superficie glaciar y densidad de un glaciar, obtenidos en dos instantes de tiempo.

Para estimar la diferencia de altura de la superficie glaciar, se emplearon las mediciones espaciales provenientes del TLS, donde la metodología de obtención del Modelo de Elevación o Digital Elevation Model (DEM) caracterizado por píxeles con alta precisión, en coordenadas x,y,z, se describe en Prantl *et al.*, (2017). La densidad glaciar se consideró como la densidad media del hielo.

### 2.4 Modelación hidroglaciológica

El modelo *Topographic Kinematic Wave Approximation and Integration* ETH Zürich (TE), simula cada proceso del balance hídrico de manera distribuida (basado en grillas) y posee orientación física. Los componentes del balance hidrológico simulados en TE son:

evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base. Los procesos criosféricos considerados son: derretimiento de nieve y hielo, la evolución del albedo y avalancha de nieve.

El proceso de modelación en Topkapi consideró ajustes iniciales como ingreso de información puntual y distribuida (precipitación, temperatura, DEM, propiedades de la red hídrica, entre otros), extrapolación de datos, modelación de la radiación y evapotranspiración potencial y real; parametrización del derretimiento de hielo y nieve; y calibración y validación del modelo de glaciar y nival.

### 2.5 Modelo de mezcla

Para distinguir entre los aportes relativos de las diferentes fuentes a la escorrentía, se empleó el modelo de mezcla basado en miembros extremos, EMMA por sus siglas en inglés. Este método se basa en las ecuaciones de conservación de masa para el caudal, para el trazador  $\delta^{18}O$  y la conductividad eléctrica (trazador hidroquímico):

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$C_T * Q_T = C_1 * Q_1 + C_2 * Q_2 + C_3 * Q_3$$

Donde  $Q_T$  es el caudal en la salida de la cuenca,  $Q_i$  es el caudal de cada una de las fuentes,  $C_i$  es la concentración de los trazadores en las fuentes y en las muestras en la salida de la cuenca. La segunda ecuación se ocupa para cada uno de los trazadores utilizados.

La incertidumbre de los aportes relativos asociados a cada muestra se realiza un método el cual emplea la incertidumbre de las concentraciones de los trazadores, tanto en las fuentes como en la escorrentía, para su propagación en el modelo de mezcla. Para la separación de hidrograma, se interpolaron temporalmente las fracciones de aporte de cada fuente y fueron ponderadas por los caudales medios diarios medidos en la cuenca.

## 3. RESULTADOS

Los principales resultados tanto del procesamiento de los datos obtenidos en terreno, como de la modelación en TE, se enfocan en la estimación de la diferencia de altura  $dh$  (m), el balance de masa GMB (mae), la cuantificación del aporte glaciar a la escorrentía ( $m^3/s$ ) y la separación del hidrograma por fuente de flujo (nieve/hielo/interacción con unidades geológicas).

En los glaciares descubiertos Bello y Yeso, se observa una tendencia en la  $dh$  (m) respecto a la elevación, donde a menor altura mayor  $dh$  (m) (figura 3 izq.). Considerando ambos glaciares, entre los 4,000-4,200 msnm la  $dh$  es mayor en el glaciar Yeso, manifestándose esta diferencia en la pendiente ( $dh/elevación$ ), donde el valor para el glaciar Yeso es cercano al triple respecto al

glaciar Bello, esto quiere decir que cada 1000 m en elevación se espera que la superficie glaciar presente un dh acumulado positivo o negativo promedio de 1.31 m y 3.24 m en los glaciares Bello y Yeso, respectivamente. Espacialmente, las mayores pérdidas de altura se presentan en el área adyacente roca/glaciar, lo cual puede estar asociado a la pérdida de nieve registrada en octubre, la cual cae desde las laderas rocosas.

La dh en el glaciar Bello, con datos entre los 4,000 y 5,000 msnm, presenta altos valores (entre -18 y -8 m) en áreas con alta pendiente y cercanos al borde del glaciar. Bajo los 4,200 msnm el derretimiento es mayor a 6 m lográndose una alta cobertura de datos. Por otro lado, la dh en el glaciar Yeso, presenta altas diferencias en los costados del glaciar, siendo de mayor relevancia el derretimiento en la zona centro oeste alcanzando montos de hasta -8 m, zona de alta pendiente. La zona centro y próxima al frente, bajo los 4,200 msnm, asociado a una rimaya, muestra montos de derretimiento sobre los 8 m.

La superficie del glaciar Pirámide, a diferencia de los glaciares blancos antes descritos, no posee una superficie regular en extensiones considerables, sino que montículos producidos por el derretimiento diferencial dado por la cobertura de detritos, considerando su bajo valor promedio de dh (figura 3 der.); similar situación se presentó en Burger *et al.*, 2018 donde las menores diferencias de altura para el periodo 2013/15 se dieron en la zona central de la lengua del glaciar. En los datos distribuidos de dh entre octubre 2017 y marzo 2018 en el glaciar Pirámide, identificándose rangos máximos de -30.4 m y 4 m y una dh promedio de -0.6 m. Las máximas pérdidas en dh, al igual que en Burger *et al.*, 2018, son asociadas a Ice Cliff (color rojo) adyacentes, su mayoría, a lagunas supraglaciales, solo que los valores reportados por este autor no superan los -6m/año en promedio para el periodo 2013/15. Los montículos presentes en la superficie glaciar, impidieron registrar extensiones continuas en ésta, debido a que provocan sombra al láser emitido por el TLS.

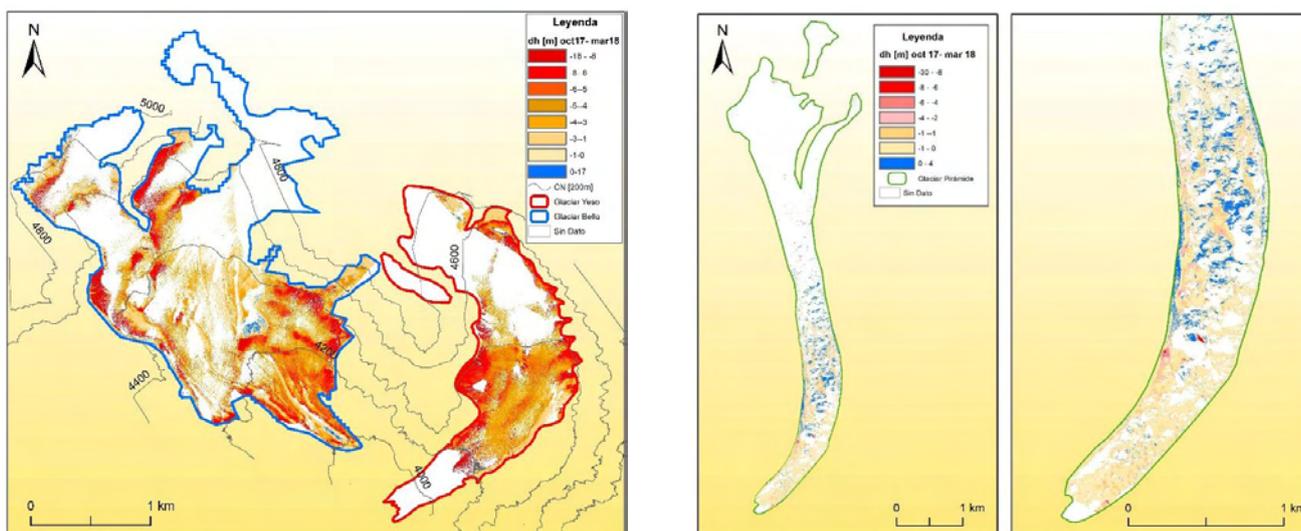


Figura 3. Mapas de diferencia de altura en los glaciares Bello y Pirámide entre octubre 2017 y marzo 2018

De acuerdo a los resultados obtenidos para dh, el balance de masa glaciar BMG [m a.e.] modelado en TE, se analizó respecto a rangos de elevación (figura 4). El comportamiento altitudinal del GMB en glaciares descubiertos (Bello y Yeso) es similar entre los 4,000-5,000 msnm, observándose valores negativos a menos elevación, sin embargo, entre los 4,000-4,200 el

glaciar Bello conserva masa glaciar respecto a Yeso, debido al efecto de la cobertura de detritos existente en el frente del glaciar; este comportamiento es similar al reportado por Ayala *et al.*, (2016) para el periodo 2014/15 con BMG máximos alrededor de -3 y -5 mea para Bello y Yeso, respectivamente. Por otro lado, los glaciares altamente cubiertos por detritos,

Pirámide y D073, muestran menor pérdida de masa respecto a los descubiertos, considerando que su extensión se encuentra mayormente bajo los 4,000 msnm., comportamiento congruente con el modelado por Ayala *et al.*, (2016). El glaciar Pirámide, con una extensión altitudinal mayor a la de los otros tres glaciares, permite conocer el efecto de protección de la cobertura de detritos en la pérdida de masa, donde en el rango 3,200-4,000 msnm se observan valores negativos de BMG a medida que aumenta la elevación, asociado a que a mayor elevación el espesor de detritos disminuye; Ayala *et al.*, (2016) reportó BMG alrededor de -4 me a los 4,000 msnm para el periodo 2014/2015, ligeramente menor al modelado en este estudio. Sobre los 4,000 msnm, el BMG del glaciar Pirámide, logra un comportamiento similar al observado en los glaciares descubiertos, lo cual

se asocia a la inexistencia de una capa de detritos en su superficie. Respecto al glaciar D073, es posible que el BMGs simulado haya sido sobreestimado, a pesar de ello, presenta ablación correspondiente a las observaciones realizadas en terreno con Terrestrial Laser Scanning (TLS).

Considerando que se cuenta con valores de BMG en toda la superficie de los glaciares, fue posible estimar el balance de masa específico promedio de verano bs estimado como la relación entre BMG (mae) en grillas de 30 m y el área del glaciar S asociado al número de grillas en cada glaciar.

El be para los glaciares descubiertos fue -1.165 (Bello) y -1.408 (Yeso), para el glaciar Pirámide -2.554 mae y rocoso D073 de -1.061 mae (figura 4) valores contextualizados según literatura previa (Burger *et al.*, 2018; Ayala *et al.*, 2016).

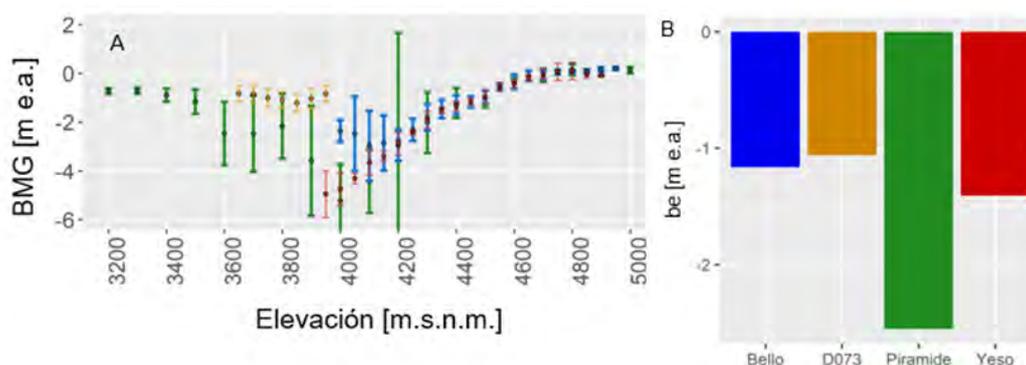


Figura 4. Distribución del BMG respecto a la elevación (A) y el balance de masa específico promedio de verano de los glaciares (B).

Los resultados de calibración se muestran en los puntos de la cuenca antes del aporte del glaciar Pirámide (F<sub>AP</sub>) y a la salida de la cuenca de estudio (F<sub>TP</sub>), se empleó la serie de caudal horario medida en F<sub>AP</sub> entre nov/2017 y abr/2018, con solo 1% de datos faltantes; para la validación, se usó la serie horaria correspondiente a F<sub>TP</sub> con un 92% de datos registrados entre sep/2017 a abr/2018.

Si bien el caudal simulado en F<sub>AP</sub> (figura 5 arr.) es subestimado en el mes de marzo, mientras que en enero y febrero fue superior al medido en un 35 y 20%, respectivamente, la evaluación del error fue satisfactoria (KGE de 6.7 y r<sup>2</sup> de 0.73). En F<sub>TP</sub> el caudal simulado

presenta mejor ajuste, excepto en el mes de enero, mes en el cual se hace evidente el aporte del glaciar Pirámide.

El resultado observado en la simulación de los caudales en Termas del Plomo, se encuentra limitado por los procesos de almacenamiento del glaciar Pirámide, los cuales controlan la respuesta hidrológica de la cuenca a partir del mes de enero (figura 5, abj.), generando un aporte máximo del 65% y drenando al final del periodo de ablación cerca del 60% del caudal medido a la salida de la cuenca, mientras que los glaciares descubiertos Bello y Yeso, aportan solo un 10%, de este modo los volúmenes aportados por la cuenca Pirámide en el mes de enero son

subestimados por el modelo y se sobreestiman los máximos diarios durante febrero. Sin embargo, el comportamiento horario simulado logra reproducir el volumen luego de tormentas

y la variabilidad diaria de caudal, de manera similar el Q sim en TP logra los volúmenes aportados por la cuenca Pirámide en el mes de enero.

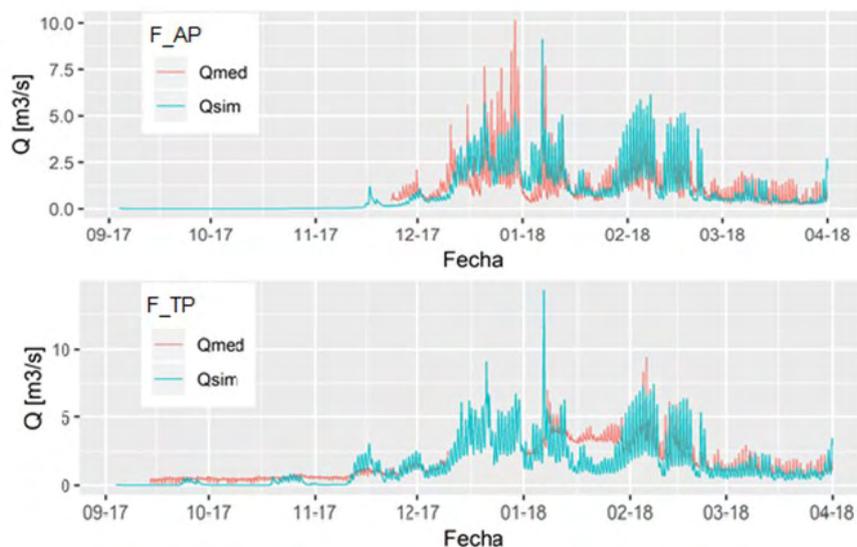


Figura 5. Descargas horarias medidas (rojo) y simuladas (azul) en F\_AP (arriba) y F\_TP (abajo).

### 3.1 Separación del hidrograma

La separación del hidrograma en la estación F\_TP mediante el modelo de mezclas, se realizó a partir de los datos de  $\delta^{18}O$  y de CE y los caudales medidos en TP. En la figura 6, se observa que los valores de aportes de agua con alta interacción con las unidades geológicas, varían desde un 70% en septiembre hasta valores inferiores al 40% a principios de diciembre. Los mayores caudales asociados a esta fuente ocurren en enero y disminuyen junto con el caudal total hacia fines de la temporada.

Los aportes directos de nieve en septiembre son nulos, aumentando durante el periodo de deshielo temprano, hasta superar el 40% de aporte de la escorrentía total en noviembre. Los mayores caudales asociados a esta fuente ocurren a fines de diciembre. Si bien, en porcentaje, los aportes de nieve directa son mayores en noviembre y principios de diciembre, en la figura 6, se aprecia que los peaks en el aporte relativo de nieve coinciden con peaks de caudal ocurridos en diciembre y enero, superando el aporte en noviembre.

Los aportes directos del derretimiento de glaciares aparecen de forma considerable en diciembre, asociado al aumento de los caudales. Tanto los caudales como la fracción de aporte correspondiente a esta fuente alcanzan sus mayores valores en enero. Posteriormente, durante marzo, tienden a disminuir a la vez que los caudales totales disminuyen.

Se debe comentar que la diferenciación de origen presenta una certeza aceptable en el caso de agua con contacto con unidades geológicas, pero no así en la diferenciación de agua de origen nival o glacial.

El modelo TE por su parte, permite simular los aportes provenientes de lluvia, nieve y hielo. En la figura 4 (izq.), se observa que el mayor aporte fue realizado por el glaciar Pirámide ( $13.3 \text{ Mm}^3$ ), seguido del glaciar Bello ( $6.3 \text{ Mm}^3$ ), Yeso ( $3.5 \text{ Mm}^3$ ) y D073 ( $0.5 \text{ Mm}^3$ ), para el periodo octubre a marzo. El aporte total nieve/hielo proveniente de los glaciares estudiados corresponde aproximadamente al 11% de la capacidad del embalse El Yeso, donde cerca del 8% proviene del aporte directo de hielo.

Respecto a la contribución total a la salida de la cuenca del río eso en el sector Termas del Plomo, el porcentaje estimado de contribución se explica principalmente por nieve (63%), seguido de hielo (24%) y lluvia (13%) durante el periodo septiembre 2017 a marzo figura 4 (der): Estos resultados reafirman con lo observado por Burger *et al.*, (2018), quien señala un incremento

del aporte de derretimiento de hielo a la escorrentía total, pasando de 11.6% entre 2000/13 a 20.4% para 2013/15. Por otro lado, Ayala *et al.*, (2016) reportó valores similares de contribución por fuente de flujo para el año 2013/14 (65%, 25% y <10% para nieve, hielo y lluvia aproximadamente).

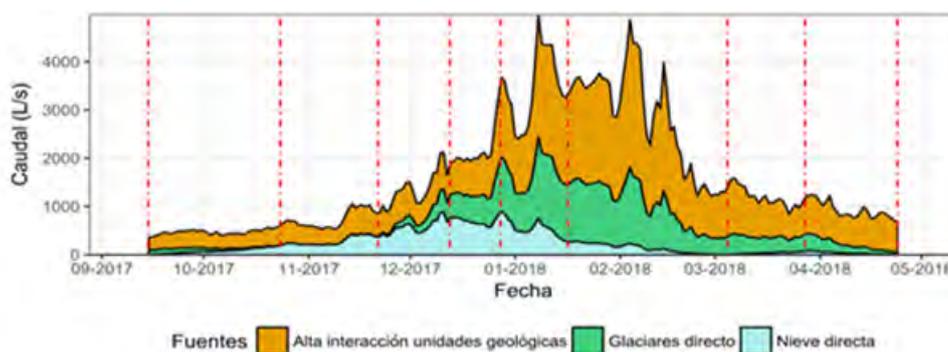


Figura 6. Separación del hidrograma en F\_TP según modelo de mezcla (unidades geológicas, glaciar o nieve, arr.) y contribución total por fuente y glaciar (abj.).

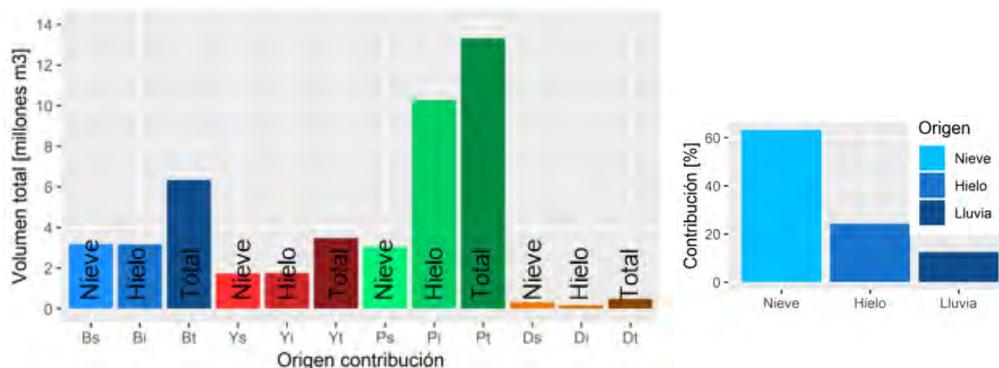


Figura 7. Contribución total de nieve/hielo por glaciar (izq.) y contribución total de nieve/hielo/lluvia a la cuenca en F\_TP (der.).

#### 4. CONCLUSIONES

Durante la etapa de ablación 2017/2018 ocurrida en la cuenca alta del río Yeso, se realizaron mediciones de caudal instantáneo, cota de elevación de la superficie glaciar y trazadores naturales en diferentes fuentes de agua, conducentes a determinar cambios en la altura glaciar y balance de masa y apoyar en la modelación de la dinámica del aporte glaciar en el sector Termas del Plomo.

Como resultado de la modelación, en términos de aporte a escala de cuenca, a la salida de la

cuenca, el volumen total aportado se compone por nieve (63%), seguido de hielo (24%) y lluvia (13%) para el periodo octubre 2017 a marzo 2018.

En términos del aporte proveniente de cada glaciar, el glaciar Pirámide contribuyó en un 56%, seguido del glaciar Bello (27%) y el glaciar Yeso (15%), donde el glaciar rocoso D073 contribuyó sólo el 2%. Desde el punto de vista de la contribución de cada glaciar a la escorrentía en la cuenca en estudio, el glaciar Pirámide aportó un 44%, proveniente de hielo,

mientras que los glaciares Bello y Yeso, que sumados contribuyeron el 20%. Este aporte glaciar, se vincula directamente con los balances de masa glaciar negativos observados y simulados, donde el glaciar Pirámide perdió cerca de 2.5 mae, seguido del glaciar Yeso (1,408 mae) y Bello (1,165 mae).

Los resultados anteriores, que representan cerca del 8% de la capacidad operativa del embalse El Yeso, una de las principales reservas hídricas para abastecimiento, están en consonancia con lo expuesto por otros autores, dejando explícita la necesidad de comprender más profundamente la dinámica glaciar durante la etapa de ablación, en términos de la gestión y anticipación a impactos en el abastecimiento producto de la variabilidad climática propia de la zona y/o cambio climático.

Tanto la campaña de medición como el proceso de modelación, permiten reafirmar que es menester profundizar en la medición sistemática

de variables como fluviométricas, meteorológicas y glaciológicas relevantes para entender los glaciares, con el fin de minimizar la incertidumbre a los procesos hidrológicos involucrados y contar así, con herramientas más robustas que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en torno a la gestión del recurso hídrico altamente dependiente de la dinámica glaciar.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este documento ha sido elaborado en el marco de la iniciativa Estudio del Aporte Glaciar a la Cuenca del Río Maipo, financiada en conjunto por Aguas Andinas, Sociedad de Canal de Maipo y la Junta de Vigilancia de la 1ª Sección del Río Maipo, y ejecutada de manera colaborativa con la Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile y Cetaqua Chile.

## **REFERENCIAS**

- Aguas Andinas. 2018. Reporte Integrado. 321 p.
- Ayala A., Pellicciotti F., MacDonell S., McPhee J., Vivero S., Campos C., Egli P. 2016. Modelling the hydrological response of debris-free and debris-covered glaciers to present climatic conditions in the semiarid Andes of central Chile. *Hydrological Processes* 30(22): 4036-58.
- Burger, F., Ayala, A., Farías, D., Shaw, T., MacDonell, S., Brock, B., McPhee, J. & Pellicciotti, F. 2018. Interannual variability in glacier contribution to runoff from a high-elevation Andean catchment: understanding the role of debris cover in glacier hydrology. *Hydrological Processes* 33: 214-229.
- Castillo, Y. 2015. Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago. 58 p.
- Dirección General de Aguas DGA. 1979. Inventario de glaciares de la hoya del río Maipo. Estudio realizado por Cedomir Marangunić para el Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Santiago, Chile. 80 p.
- Dirección General de Aguas DGA. 2011a. Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central. Estudio realizado por Geoestudios Ltda para el Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. S.I.T. 382. Santiago, Chile. 178 p.
- Dirección General de Aguas DGA. 2011b. Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central - Anexos. Estudio realizado por Geoestudios Ltda. para el Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. S.I.T. 265. Santiago, Chile. 139 p.
- El Mercurio. 2019. Inventario será publicado en vísperas de la COP25: el 53% de avance, catastro de glaciares revela pérdida de hielos y fragmentación. Nieves Aravena, periodista.

- Peña, H. Nazarala, I. 1987. Snowmelt-runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. Proceedings of the Vancouver Symposium. Vancouver. IAHS Publ. No. 166. 12 p.
- Prantl, H., Nicholson, L., Sailer, R., H. F., Irmgard, J. & Rastner, P. 2017. Glacier Snowline Determination from Terrestrial Laser Scanning Intensity Data. *Geosciences* 7(60): 1- 21.
- Rivera, A., F. Bown, D. Carrion, & P. Zenteno. 2012. Glacier responses to recent volcanic activity in Southern Chile. *Environmental Research Letters* 7, 014036. 15 p.
- Vaughan, D.G., Comiso, J.C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. & Zhang, T. 2013. Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K.M., Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 66p.
- World Glacier Monitoring Service WGMS. 2008. *Global Glacier Changes: facts and figures*. United Nations Environment Programme. 45 p..

*Como citar este artículo:*

Quevedo-Tejada, D., Landeros, E., Olivares, D., McPhee, J., Caro, A., Berroeta, C., Poblete, C., Reyes, J., Fleege, H., Carvallo, J., Fuentes, J. (2019). Dinámica de la contribución glaciaria a la cuenca alta del río Yeso durante el periodo de ablación 2017/2018. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 59-70. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-06

## Planteamiento del problema y propuesta de soluciones para abordar el desafío de la gestión de las aguas lluvias en el área metropolitana de San Salvador (AMSS), El Salvador

*Problem statement and solution proposal to address the challenge of storm water management in the metropolitan area of San Salvador (AMSS), El Salvador*

Pablo Gómez Blanco<sup>1\*</sup>, Luis Fernández Martínez<sup>1</sup>, Enrique Manuel Flores<sup>2</sup>,  
Oscar Eduardo Hernández<sup>2</sup>

Recibido: 23/05/2019

Aceptado: 14/08/2019

\*Autor de correspondencia



### Resumen

Existen diversos eventos de precipitación que han causado daños importantes derivados de la ocupación del territorio y la falta de espacio para el agua dentro del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Sin embargo, a pesar de no ser relevante en cuanto a la variable precipitación acumulada, el 3 de julio de 2008, sucedió un desgraciado incidente que cambió el ritmo de los acontecimientos y desencadenó la puesta en marcha de medidas para reducir los problemas derivados de la peligrosidad por inundación, fallecieron 30 personas de una misma congregación religiosa que viajaban dentro de un autobús camino a casa en la Calle Montserrat a la altura de la Colonia La Málaga en San Salvador. A partir de dicho instante, el problema trascendió al ámbito político y se desarrollaron varios estudios y construcciones encaminados a minimizar los efectos de las inundaciones fluviales en el AMSS. El presente artículo establece el desarrollo de lagunas de laminación y SUDS como la propuesta para paliar los efectos de las inundaciones fluviales en el ámbito urbano y presenta criterios: económico-financieros, socio-políticos, ambientales e hidrológico-hidráulicos; para acotar la tipología y ubicación de las mismas. La evaluación conjunta de los diversos criterios permite establecer un criterio de priorización de medidas válido para la elaboración de futuros planes maestros de gestión de aguas lluvias. Basándose en estos criterios se planteó la construcción de un sistema compuesto por tres reservorios de retención para minimizar los efectos de las inundaciones en el ámbito del Arenal de Montserrat una de las cuencas con mayores problemas en la gestión de aguas lluvias dentro del AMSS. En este contexto, se justifica la necesidad de contar con una planificación maestra para el desarrollo de soluciones encaminadas a resolver tanto los problemas derivados del drenaje fluvial como del pluvial en los sistemas tradicionales de alcantarillado – por ser el destino de éstos los cauces del AMSS y por contar con numerosos problemas por la falta de capacidad y mantenimiento de los mismos.

**Palabras clave:** lagunas de laminación, inundaciones, Plan Maestro de aguas lluvias.

### Abstract

*Many heavy rainfall events have caused severe damaged related with occupation of the territory and lack of space for water paths inside the Metropolitan Area of San Salvador (MASS). However, despite not being relevant in terms of accumulated rainfall, the 3rd of July of 2008, an unfortunate incident happened that changed the pace of events and triggered the settlement of measures aimed to reduce the flood hazard problems. 30 people from the same religious congregation that travelled back home in the same bus passed away in Montserrat street next to Colonia La Málaga in San Salvador. From this moment, the problem transcended to the political sphere and different technical studies and constructions were carried out in order to minimize the effects of river floods in the MASS. This article establishes the development of detention ponds and SUDS as the proposal to cope the effects of river floods in the urban area, as long as presents criteria: economic-financial, socio-political, environmental and hydrologic-hydraulic; in order to define their typology and location. The multi-criteria evaluation purposed establishes a criterion for prioritizing valid measures for the elaboration of future rainwater management master plans. Based in those criteria, the construction of a storm water detention system of three reservoirs to minimize the flood effects in the Arenal de Montserrat influence area – one of the watersheds with greater difficulties in the storm water management within the MASS. In this context, the need of a storm water Master Plan is justified in order to find solutions to solve the drainage capacity either form rivers and sewerage – because their spillage ends in the MASS rivers and they present uncountable problems of capacity and lack of maintenance.*

**Keywords:** detention ponds, floods, storm water Master Plan.

1 Vielca Ingenieros, S.A. El Salvador. pablo.b@vielca.com; luis.f@vielca.com

2 Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, El Salvador. enrique.flores@mop.gob.sv; oscar.hernandez@mop.gob.sv

## **1. INTRODUCCIÓN**

A lo largo de la primera década del siglo XXI, se puso de manifiesto la debilidad de El Salvador ante los fenómenos naturales y la vulnerabilidad frente a los posibles efectos del cambio climático. Agencias especializadas llegaron al punto de ubicarlo como el país más vulnerable de Centro América (CEPAL, 2011), país más vulnerable del mundo (UNDAC, 2010), y primer lugar en el índice de cambio climático (Harmeling, 2010), que coinciden en que el 89% del territorio nacional y el 95% de su población estarían en riesgo de afección.

La vulnerabilidad expresada por dichas agencias estaba fundamentada en parte por la sucesión de fenómenos extremos de precipitación y la generación de escorrentías que provocaron inundaciones. Concretamente, posterior al huracán Stan del 2005, en solo dos años el país fue golpeado por cinco eventos climáticos extremos: las tormentas tropicales Ida en 2009; Agatha, Alex y Mathew en 2010, y la depresión tropical 12E (DT12E) en 2011.

Sin embargo, fue un evento convencional y de escasa magnitud el que en julio de 2008 sacudió a la sociedad salvadoreña y propició la adopción de medidas por parte de los tomadores de decisiones. Un autobús perteneciente a una iglesia local fue alcanzado por un desbordamiento de las aguas en el entorno de la Colonia La Málaga, en el Arenal de Monserrat, con 31 personas a bordo, perdiendo la vida todas ellas a excepción de un pasajero. El impacto social de esta noticia, demandó elevar el diálogo al ámbito político y arrancar el compromiso de obtener financiamiento y finalizar los estudios que ya se estaban desarrollando, para convertir las propuestas en medidas encaminadas a la resolución de esta problemática (figura 1).

Con objeto de resolver los problemas derivados de las inundaciones en el AMSS, Gobierno y Empresa Privada promovieron estudios científicos de las cuencas hidrográficas del área metropolitana, orientados a identificar y caracterizar sus elementos importantes e.g. usos del suelo (Planes Directores de OPAMSS), hidrografía ríos y quebradas (delimitadas por el MARN), inventario de obras de paso (CES-CLASS, 2000; CCAS, 2010), catastro de

infraestructuras de drenaje (Lotti y Associatti, 2002; Inypsa, 2018), etc., así como a la realización de diagnósticos (Huet y Mena, 1999; Lotti y Associatti, 2002; BID, 2016), planes directores (SWECO, 2003) y propuestas concretas de diseño. Sin embargo, ninguno de los estudios específicos ni planes directores consiguió financiación para llevar a cabo las obras que en ellos se definían.

En este contexto, el Gobierno de la República de El Salvador y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) firmaron un préstamo para la ejecución del Programa de Reducción de Vulnerabilidad de Asentamientos Urbanos Precarios en el Área Metropolitana de San Salvador programando ejecutar entre los años 2013-2018, por un monto de 50 millones de USD cuyo objetivo general era reducir la vulnerabilidad y mejorar las condiciones de vida de familias que viven en Asentamientos Urbanos Precarios (AUP), expuestas a riesgos de inundaciones y deslizamientos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

El programa financiaría tres componentes: (i) Reducción de vulnerabilidad en AUP a través de construcción de lagunas de laminación y reparación de bóvedas en el AMSS; (ii) Mejoramiento integral y mitigación de riesgos de AUP en el AMSS; y (iii) Fortalecimiento institucional del sector.

Dentro del primer componente se desarrollaron los proyectos de obras de amortiguamiento del macrodrenaje pluvial en el AMSS (Vielca, 2017), en el que se partió del análisis de once posibles ubicaciones para finalmente proponer el desarrollo, en una primera etapa, de la laguna de Colonia Luz; cumplimentada con el desarrollo posterior, de dos lagunas de laminación en el sitio conocido como El Piro. Entre los objetivos del presente trabajo se encuentra la modelación hidrológico-hidráulica de la cuenca del Arenal de Monserrat para la evaluación y el diseño de lagunas de laminación como elementos encargados de amortiguar los caudales pico de las avenidas extremas; así como la integración de sus resultados en un análisis multicriterio en donde adicionalmente se consideren factores económico-financieros, socio-políticos y ambientales para la priorización de acciones y toma de decisiones.



Figura 1. Cuenca alta del Arenal de Montserrat y ubicación de la zona de La Málaga

## 2. METODOLOGÍA

El AMSS se encuentra enclavado entre las faldas del volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, ocupando en su mayoría la cabecera de cuenca del río Acelhuate. Las inundaciones que sufren las comunidades aledañas a los cauces son cada vez más recurrentes y se deben a diversos factores (Fernández-Lavado, 2010):

- Fisiografía de los cauces e intensidad de precipitación. Se trata de la transición entre el curso alto y medio de una quebrada; con flujo discontinuo; fuertes pendientes en cabecera y cauces bien definidos frente a la aparición de diversas terrazas fluviales, concordantes con las respuestas de los cursos fluviales a las inundaciones históricas, y cursos meandriiformes en el fondo del valle.
- Es en esta zona i.e. el fondo del valle donde se establece y asienta la ciudad, presentando un crecimiento falto de ordenación territorial, hasta que se constituye la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).
- Crecimiento urbano, como motivo de la impermeabilización de la cuenca y del aumento de la exposición de la población a la peligrosidad por inundación.
- Invasión de los cauces, por la proliferación de infraestructuras y, sobretudo, la aparición de asentamientos urbanos precarios, que tienden a ocupar terrenos destinados al

trasiego de caudales en tiempo de avenidas extremas.

- Consideración del cambio climático y la variabilidad climática, a través de las conclusiones alcanzadas en MARN (2018) en lo relativo al comportamiento de la variable precipitación, en términos de distribución mensual de la misma, la disminución en términos globales de su acumulado anual y la tendencia a aumentarse la recurrencia de los eventos extremos y el aumento de las intensidades de precipitación.

Las lagunas de laminación constituyen una alternativa de solución a dicha problemática puesto que se encargan de retener parte del volumen del hidrograma durante las crecidas, reduciendo el pico y el impacto aguas abajo de la infraestructura (Tucci, 2007). Dentro de esta tipología de actuación se plantearon soluciones que careciesen de elementos de control de operación, tales como compuertas, equipos de bombeo, etc., de manera que la crecida es regulada por la capacidad del desagüe de fondo que está diseñado para que deje circular libremente los caudales ordinarios y su capacidad máxima de evacuación no cause daños a la población ribereña aguas abajo de la presa y las condiciones del vertedero superficial, debiendo ser capaces entre ambos elementos de aliviar el caudal de diseño sin producir afecciones a la población aguas arriba de la infraestructura (figura 2).



Figura 2. Vista virtual de la laguna de laminación de Colonia Luz

En Blanco y Vila (2018) se establecen los criterios de selección que se emplearon en los diseños de lagunas de laminación dentro de Vielca (2017), analizando distintos factores intrínsecos de las ubicaciones pre-establecidas que acaban condicionando el posible desarrollo de alternativas. En base a ello, los criterios a considerar pueden establecerse como sigue:

- Hidrológico-hidráulicos, a partir de la modelación hidrológica pseudo-distribuida de las cuencas de estudio en Hec-HMS se pueden seleccionar las zonas prioritarias de actuación, por ser las que producen mayor impacto sobre el territorio en cuanto a la problemática detectada y las necesidades de laminación de caudales. La determinación de caudales circulantes requiere del conocimiento de las siguientes variables de estado y parámetros:
- Precipitación, cuya definición se plantea tanto para eventos históricos como a partir del estudio de las series históricas de precipitación máxima en 24 h (figura 3).

Desde principios del S-XXI se cuenta con registros telemétricos automatizados de precipitación en algunas ubicaciones del AMSS, con lo que se puede realizar un análisis estadístico de dichas series 5-10-15 minutos para determinar qué eventos registrados superan un determinado umbral mediante la metodología

PoT (del inglés, *Peaks over Threshold*) – que defina, por ejemplo los 5 años de periodo de retorno. Al mismo tiempo, del estudio de estas series se pueden determinar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y Precipitación-Duración-Frecuencia (PDF) que acaban definiendo la relación existente entre la precipitación caída en una duración infra-diaria y la correspondiente a una duración de 24 h.

Por otro lado, desde principios de la década de 1970 se cuenta con registros de precipitación máxima diaria en diversas estaciones del país aunque algunas de ellas vieron interrumpidas sus mediciones en el período de guerra civil que terminó con la firma de los Tratados de Paz en 1992. Del análisis estadístico de estas series de precipitación, con mayores registros que los de las series telemétricas, se extraen las precipitaciones estadísticas asociadas a diversos periodos de retorno y duraciones (con ayuda de las relaciones establecidas en el análisis realizado con las series telemétricas).

- Hidromorfometría, determinada a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) proveniente de un vuelo LiDAR a escala nacional finalizado en el año 2014 y cuyo cálculo fue realizado con apoyo de Sistemas de Información Geográfica (GIS) (figura 4).



Figura 3. Resultados del estudio hidrometeorológico de precipitaciones, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: a) Curva precipitación-duración-frecuencia en la estación Boquerón; b) Curva intensidad-duración-frecuencia en la estación boquerón; c) relación existente entre las láminas de precipitación de 24 h en el AMSS y las obtenidas en Erazo (2008) a escala nacional; d) Construcción de hietograma de bloques alternos para un evento de 50 años de periodo de retorno y 90 min de duración en la estación Aeropuerto.

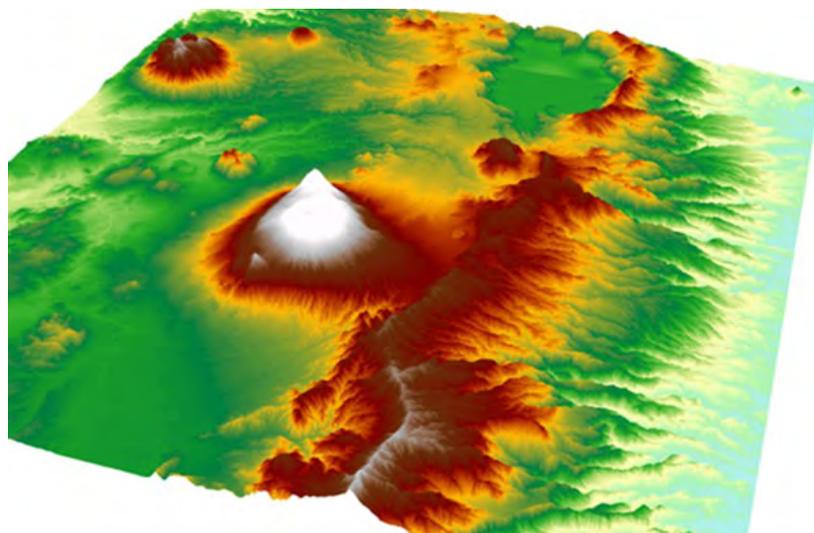


Figura 4. Levantamiento LiDAR empleado como MDE en la modelación hidrológica (Vielca, 2017)

En primer lugar, se procesa el MDE para buscar endorreísmos y generar una red capaz de evacuar las aguas desde los puntos con mayor elevación a los de menor cota por gravedad. A partir del MDE corregido en dichos términos se identifica

la red de drenaje y se determinan las cuencas de aporte de un determinado tamaño existentes dentro del ámbito de estudio. Ambos resultados permiten calcular los siguientes parámetros hidromorfométricos:

- Superficie de la cuenca, en m<sup>2</sup>.
- Longitud de drenaje, en m, desde el punto con mayor tiempo de recorrido dentro de la cuenca hasta el desagüe de la misma.
- Elevación de los puntos de mayor tiempo de recorrido y del punto de desagüe de cada cuenca.
- Pendiente, en m/m, y tiempo de concentración de la cuenca, en min.
- Usos del suelo, considerando para el escenario actual y futuro (año 2030) los lineamientos definidos en el Esquema Director del AMSS (OPAMSS, 2016) y empleando la fotografía histórica e imágenes satelitales provenientes del proyecto LandSat 7 para la fotointerpretación y clasificación supervisada de usos del suelo, respectivamente.

Los usos del suelo se introducen en el modelo hidrológico a partir del parámetro Número de Curva (CN), que se emplea para su calibración y ajuste.

Existen varios estudios hidrológicos e.g. Bertoni y Catalini (2005), CCAS (2010), MARN (2012), BID (2016), entre otros que plantean escenarios equivalentes en el entorno del AMSS, obteniendo resultados muy distintos, por lo que resulta fundamental la calibración de los mismos para poder tener garantías de la bondad de los análisis realizados y de las conclusiones alcanzadas (figura 5).

Por otro lado, existen estaciones hidrométricas automatizadas que registran los niveles alcanzados en tres puntos de la cuenca del río Acelhuate i.e. El Piro, Belloso y Guazapa con valores cada 5-10-15 minutos, aunque cuentan con registros cortos y discontinuos en alguna época, lo que dificulta generalizar su análisis para la calibración de este tipo de modelos; además de bases de datos con registros de niveles alcanzados e.g. Desinventar. Desinventar es una base de datos con información sistemática sobre la ocurrencia de desastres cotidianos de pequeño y mediano impacto, entre los que se encuentran registros de precipitación e inundaciones. Sus resultados pueden consultarse en Desinventar (2019). MARN El Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales cuenta con un registro

histórico de inundaciones a nivel nacional con registros desde 1921 y que puede consultarse en SNET (2019), y otras como las de OPAMSS y DACGER, además de trabajos de campo post-evento, como Fernández-Lavado (2010) o archivos multimedia georreferenciados e.g. como lo ocurrido el 3 de julio de 2008 en la Calle Monserrat con el autobús de feligreses de la Iglesia Elim y que se puede ver en Youtube (2019) que permiten delinear la afección que una determinada tormenta tuvo sobre el territorio.

Todos estos registros han sido analizados con modelación hidráulica uni y bidimensional (con ayuda de Hec-RAS e IBER, respectivamente) para ajustar los caudales circulantes por los distintos tramos de cauce del AMSS asociados a los distintos eventos históricos seleccionados e.g. la figura 6. Modelación hidráulica en IBER para el evento STAN aguas abajo de Barrio La Vega (Vielca, 2017) muestra la calibración de la superficie de inundación que ocupó el evento STAN en 2005 en base a los resultados reportados por Fernández-Lavado (2010).

Con base en los resultados de la modelación hidrológica se realiza un estudio hidráulico que con ayuda de GIS permita cuantificar los daños por inundación ocasionados para cada evento sobre el territorio, pudiendo traducir los mismos en costes monetarios en función de la tipología de usos del suelo afectados y su valoración económica, así como los niveles alcanzados por el agua en cada punto.

La diferencia, en costes de daños ocasionados, existente entre la inundación producida para cada evento y la misma una vez adoptadas las medidas propuestas e.g. lagunas de laminación, mejora de los sistemas existentes, implantación de SUDS, etc., constituye el beneficio obtenido por la implantación de dichas medidas.

El referido beneficio puede compararse con el coste de los daños producidos, definiendo un criterio de priorización de actuaciones proveniente del análisis hidrológico-hidráulico.

- Económico-financieros, la falta de una ley nacional de aguas que salvaguarde el acceso al agua para toda la población y la protección de los cursos naturales condiciona el planteamiento de actuaciones en el ámbito del AMSS, puesto que gran parte del

territorio es de titularidad privada y su adquisición requeriría de desembolsos considerables o la gestión de expedientes de expropiación que dilatarían los tiempos de actuación.

Por ello resulta como condicionante el planteamiento de actuaciones en terrenos de titularidad pública (figura 6).

En otro orden de cosas, el Plan Maestro para la Gestión Sustentable de las Aguas Lluvias del

AMSS (PM-GESALAMSS) plantea una herramienta para la toma y priorización de decisiones a la hora de abordar medidas estructurales en busca de la reducción de la vulnerabilidad de la población frente a inundaciones.

La citada herramienta está fundamentada en la topología del sistema hidrológico y tiene en consideración los siguientes principios básicos:

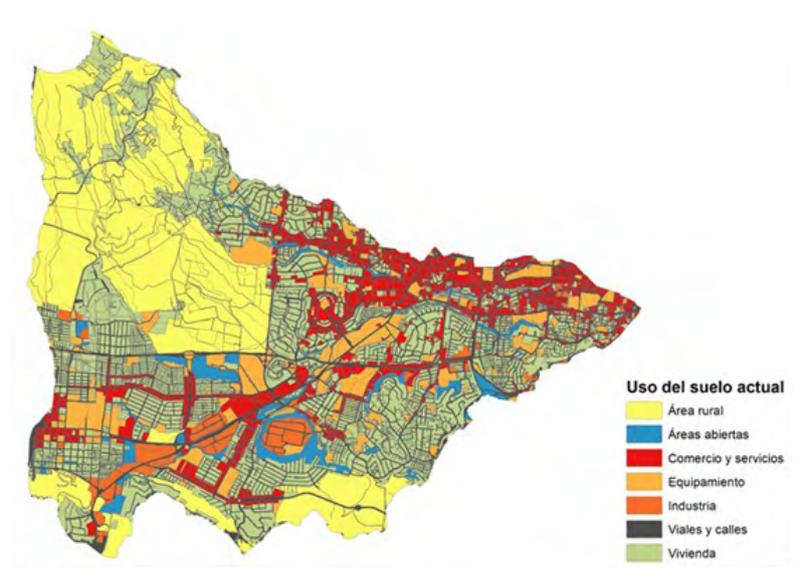


Figura 5. Usos del suelo empleados en la modelación de la cuenca del Arenal de Montserrat (adaptado de Vielca, 2017)

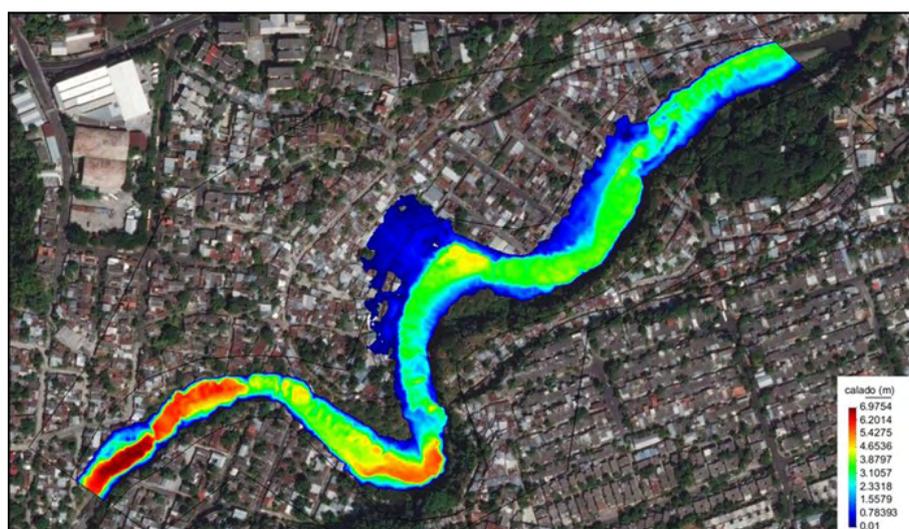


Figura 6. Modelación hidráulica en IBER para el evento STAN aguas abajo de Barrio La Vega (Vielca, 2017)

– Las medidas que se adoptan aguas arriba de un determinado punto son las responsables

de la reducción de la vulnerabilidad en el mismo.

- La contribución de cada medida adoptada es función del peso específico i.e. el volumen de laminación frente al volumen de laminación total aguas arriba de cada punto de la misma en cada punto del territorio.
- El beneficio obtenido medido como diferencia entre los daños ocasionados sin la adopción de medidas y tras la adopción de las mismas, en línea con lo señalado en los criterios hidrológico-hidráulicos es responsabilidad de cada una de ellas en función de su peso específico.

El criterio para la búsqueda de solución del problema es doble: por un lado, se puede perseguir la minimización de la relación costo/beneficio entendiendo el costo como el de construcción de las medidas estructurales y, por otro lado, se puede perseguir el maximizar el beneficio con una determinada cantidad de dinero.

La adopción de uno u otro planteamiento será función de si se cuenta con una financiación dependiente de aportaciones constantes o variables en función de determinadas tasas o gravámenes; o si se cuenta con una línea de inversión, provenientes del estado o de un organismo multilateral, para la construcción de medidas estructurales; respectivamente.

- Socio-políticos, en línea con la componente económico-financiera en cuanto a que la titularidad de los terrenos que colindan con los cauces es privada y dado que el AMSS presenta un fuerte crecimiento poblacional en parte por el crecimiento vegetativo del país, pero también debido a la migración interna desde el ámbito rural en busca de oportunidades laborales.

Ambos factores inciden en que las Comunidades con mayor escasez de recursos busquen residencia en terrenos vulnerables, tales como los próximos a vertederos de residuos, a terrenos con inestabilidad de taludes, peligrosidad por lahares o peligrosidad por inundación (Blanco y Vila, 2018).

Los cauces del AMSS presentan este tipo de asentamientos urbanos precarios (AUP) en los que se requiere de experiencia en manejo y gestión social para realizar cualquier tarea de

campo e.g. inspección del área, relevamientos topográficos, estudios de suelo y geotecnia, censos poblacionales, inventarios de fauna y biota, etc., lo cual dificulta en gran medida la viabilidad de las propuestas de ubicación de lagunas de laminación en sitios en los que la población de AUP sea elevada, más si cabe al considerar dentro de la propuesta la opción de reasentar a los miembros de las Comunidades afectadas.

- Ambientales, como complemento al resto de criterios y siguiendo los lineamientos de evaluación ambiental del MARN, se deben realizar estudios específicos de caracterización biológica e.g. flora, fauna, calidad de aguas, etc., y paisajística del medio que sirvan de línea base para la evaluación correspondiente.

Los criterios ambientales sirven adicionalmente para poner en valor y conservar algunas zonas verdes de la ciudad, además de condicionar los posibles emprendimientos de actuaciones a una serie de medidas protectoras y correctoras frente a los impactos negativos que pudieran producirse.

Estos criterios resultan ser la base para el análisis y la toma de decisiones en cuánto a ubicación y priorización de actuaciones de lagunas de laminación como respuesta al problema de inundaciones ribereñas en los cauces fluviales del AMSS, tal y como se establece en Vielca (2017) y se presenta en Blanco y Vila (2018).

Frente a esta visión limitada a la propuesta de lagunas de laminación para la resolución del problema de inundaciones, se plantea la necesidad de una planificación maestra en la gestión de aguas lluvias en el AMSS (PM-GESALAMSS), la cual está siendo financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y que está desarrollando Vielca Ingenieros, S.A. en la actualidad.

En ella, el planteamiento de medidas estructurales amplía su gama de actuaciones (más allá de la construcción de lagunas de laminación), incluyendo la actualización, reparación y mejora de los sistemas tradicionales que destacan por su falta de capacidad; así como la adopción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y la reforestación de espacios

naturales degradados. La priorización de las distintas tipologías de medidas estructurales propuestas, más allá de las lagunas de laminación propuestas en Vielca (2017), en base a un criterio que integre los resultados de la modelación hidrológico-hidráulica y un análisis costo/beneficio de las inversiones realizadas constituyen la base de innovación del presente estudio.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La selección por criterios hidrológico-hidráulicos fue aplicada al caso del diseño de lagunas de laminación en la cuenca del Arenal de Montserrat del AMSS (Vielca, 2017). Se estudió la implantación de reservorios en once ubicaciones distintas dentro de la cuenca, desarrollando a nivel de diseño final únicamente tres proyectos constructivos i.e. Colonia Luz (actualmente en construcción y con 210,000 m<sup>3</sup> de capacidad de laminación), El Piro aguas arriba (con 215,000 m<sup>3</sup> de capacidad) y El Piro aguas abajo (con 190,000 m<sup>3</sup> de capacidad). En Vielca (2017) se evaluaron los resultados de laminación en tres puntos de control: CIFCO-MOP, Colonia La Málaga y Barrio La Vega.

Tras realizar el análisis multi-criterio establecido con anterioridad, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los sitios de El Triunfo y Suncita se encuentran dentro del parque del Bicentenario, que constituye una de las principales áreas medioambientalmente protegidas de la ciudad. Por otro lado, sus cuencas tributarias son pequeñas y se conservan próximas a su estado natural, lo que descarta adicionalmente su actuación por criterios hidrológico-hidráulicos.
- El sitio de La Mascota ocupa parte del parque Maquilishuat, donde existen diversas especies de flora y árboles de gran tamaño. Por otro lado, la adecuación de la parcela para la ubicación de un reservorio de detención requeriría de la realización de grandes desmontes, encareciendo los movimientos de tierra los costes de construcción. Ambos factores, junto con el criterio hidrológico-hidráulico, dado que su

capacidad de laminación sólo aportaría a la mejora del punto de control de Barrio La Vega, contribuyeron al descarte del sitio de actuación.

- Los sitios de Chapupo y Jardines de Guadalupe se encuentran en la subcuenca del Arenal de San Felipe, en donde se reportan escasos problemas de inundaciones; se dispone de poco volumen de almacenamiento; y el hidrograma de escorrentía se encuentra desacoplado del hidrograma de la cuenca del Arenal de Montserrat, lo que conlleva que cualquier actuación en el Arenal de San Felipe podrá servir para disminuir el volumen del hidrograma resultante pero no para reducir el caudal punta circulante en los puntos de control. Por todo lo anterior se descartaron las actuaciones previstas dentro de esta subcuenca.
- Los sitios de Buenos Aires 1 y 2, así como el sitio de Merliot son de titularidad privada y se encuentran ubicados en zonas con elevado potencial de desarrollo y valor económico. A pesar de que ambos sitios se encuentran en cabecera de la cuenca principal y tienen potencial para albergar lagunas mayores de 150,000 m<sup>3</sup>, los costes de adquisición de los terrenos hicieron inviable la propuesta.
- Finalmente se seleccionaron los sitios de El Piro 1 (aguas arriba) y 2 (aguas abajo) además del sitio de Colonia Luz, como los propuestos para el desarrollo de los estudios y diseños finales.

En ambos se llevaron a cabo trabajos de topografía y estudios de suelos y geotecnia, se elaboró un censo poblacional de familias afectadas y se generó la documentación técnica necesaria, incluyendo los preceptivos Estudios de Impacto Ambiental, para poder llevar a cabo las obras de construcción. Sin embargo, los sitios de El Piro cuentan en su área de desarrollo con el asentamiento de dos Comunidades, i.e. La Cuchilla y El Tanque, con más de 500 familias, lo que en términos socio-políticos impide el desarrollo de actuaciones hasta que no se plantee una solución habitacional complementaria al proyecto. En base a todo lo anterior se decidió llevar a cabo la construcción únicamente de la

laguna de Colonia Luz, que se encuentra inmediatamente aguas arriba de la Colonia La Málaga, dentro del cauce principal del Arenal de Montserrat y sin grandes afecciones socio-políticas y ambientales. Pero las propuestas de Vielca (2017) se limitaban al desarrollo de lagunas de laminación dentro del Arenal de Montserrat, mientras que los problemas de inundación se presentan en varios puntos del AMSS y no se limitan a las inundaciones ribereñas, sino que también existen problemas por falta de capacidad de los sistemas de drenaje pluvial (figura 7 y 8).

En este contexto se desarrolla el Plan Maestro para la Gestión Sustentable de Aguas Lluvias en

el AMSS (PM-GESALAMSS), proponiendo soluciones a los problemas relacionados con las aguas pluviales en todo el ámbito metropolitano. En la medida en que dichos problemas están relacionados con las inundaciones ribereñas, las lagunas de laminación tienen un papel relevante en su resolución. Sin embargo, existen problemas en este rubro que quedan alejados de los cauces principales y que además se presentan de manera más recurrente, tales como el corte de calles por la acumulación de agua en puntos bajos, el colapso de tuberías y bóvedas o el cierre de espacios públicos por problemas de inundaciones.



Figura 7. Universo con posible ubicación de embalses y puntos de evaluación de resultados (Blanco y Vila, 2018)



Figura 8. Problemas de falta de capacidad de las redes de drenaje pluvial secundario existentes (Protección Civil de El Salvador)

Muchos de estos problemas han sido identificados y existen estudios que documentan su problemática, con lo que el PM-GESALAMSS se limita a revisar la documentación disponible y realizar una evaluación hidrológico-hidráulica para la propuesta de soluciones. En cualquier caso, su problemática está asociada a la falta de cobertura y mantenimiento de las redes de drenaje pluvial secundario. Por ello se torna necesario evaluar el estado de dichos sistemas y realizar una propuesta holística de soluciones. En este sentido, dentro del PM-GESALAMSS se genera una base de datos completa que recopila los distintos catastros de redes de drenaje pluvial secundario realizados desde principios del S-XXI e.g. Lotti y Associatti (2002), Inypsa (2018), etc., unificando criterios de definición y corrigiendo las inconsistencias encontradas. A partir de la misma, con tratamiento en GIS de la información, se construyen modelos hidráulicos en EPA-SWMM para evaluar la capacidad de los sistemas y decretar los puntos y tramos faltos de capacidad y que en consecuencia son susceptibles de presentar problemas de flujo en superficie. Para resolver estos problemas, el PM-GESALAMSS establece soluciones consecuentes con la filosofía de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que sean capaces de recoger los volúmenes excedentes y transferirlos de manera diferida a las redes al

tiempo que fomenten otros procesos como la infiltración o la biorretención de contaminantes – además de otros beneficios como la disminución de temperatura ambiente, la generación de infraestructura verde urbana o el aumento de las abstracciones iniciales en el proceso lluvia-escorrentía, entre otros (figura 9).

Tanto la propuesta de soluciones tipo SUDS como las lagunas de laminación pueden relacionarse a través del parámetro “capacidad (o volumen) de laminación” (en  $m^3$ ), pudiendo establecerse una relación de costes en función del mismo, i.e. USD/ $m^3$ .

- La relación de costes establecidos para las medidas tipo SUDS oscila entre los 220 USD/ $m^3$  y los 1,100 USD/ $m^3$ , en función de la capacidad de almacenamiento libre disponible, e.g. el índice de huecos si se trata de almacenamiento en medio poroso y las medidas de adecuación paisajística o mejoramiento urbano previstas.
- La relación de costes de las lagunas de laminación oscila entre los 70 USD/ $m^3$  y los 110 USD/ $m^3$ , variando en función de las necesidades de impermeabilización y protección de los taludes del perímetro de embalse. Cabe destacar que se trata de embalses mayores a los 100,000  $m^3$  de capacidad y con una altura de cerrada inferior a los 20 m.

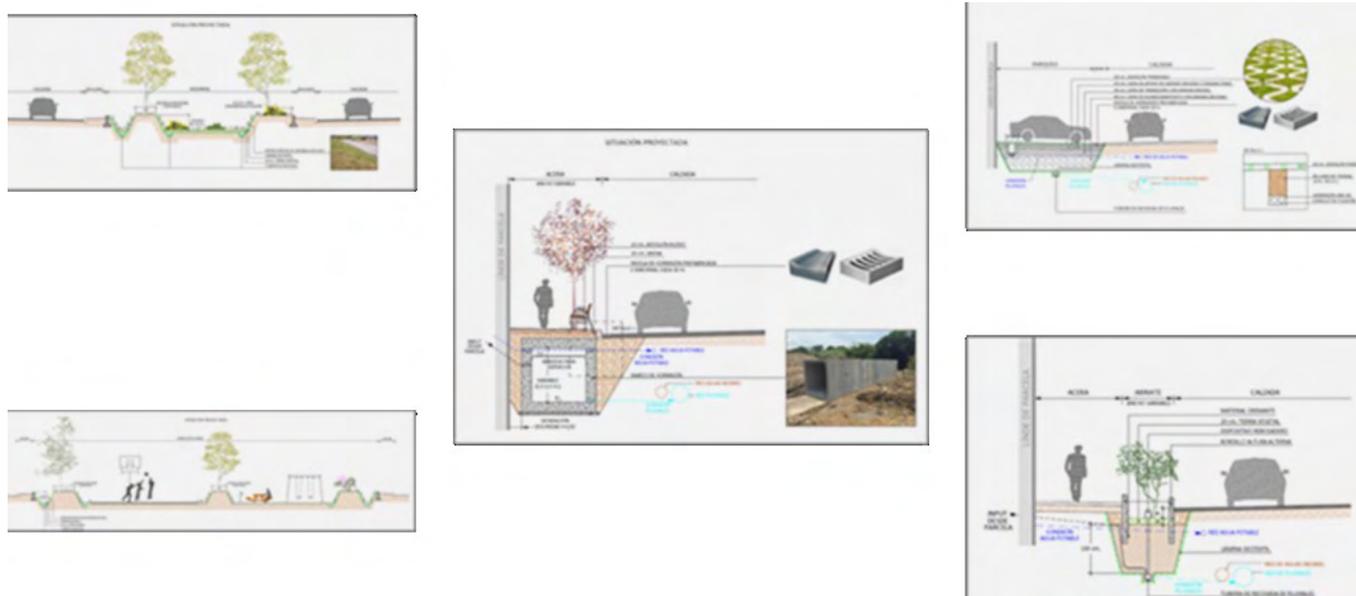


Figura 9. Propuesta de medidas tipo SUDS establecidas en el PM\_GESALAMSS

Dicha relación se establece como parámetro de base en el análisis costo/beneficio del PM\_GESALAMSS, aunque deba corregirse para considerar la mayor recurrencia de problemas en el ámbito de las redes de drenaje pluvial secundario y los beneficios adicionales asociados con la adopción de SUDS (figura 10).

El análisis costo/beneficio se aplica a las distintas medidas establecidas, quedando su beneficio definido en base a la topología de la red de cauces y el peso específico (relación entre volúmenes disponibles) que cada medida tiene

respecto de la capacidad de laminación aguas arriba de un determinado punto de la red.

En base a esta premisa se construyen las relaciones costo/beneficio para cada uno de los eventos de evaluación del PM\_GESALAMSS, pudiendo comparar los resultados en función de la recurrencia de cada una de las tormentas de diseño.

El resultado es una propuesta de priorización de medidas financieramente sostenible que deberán desarrollarse a lo largo del periodo de implementación del Plan Maestro i.e. 20 años.

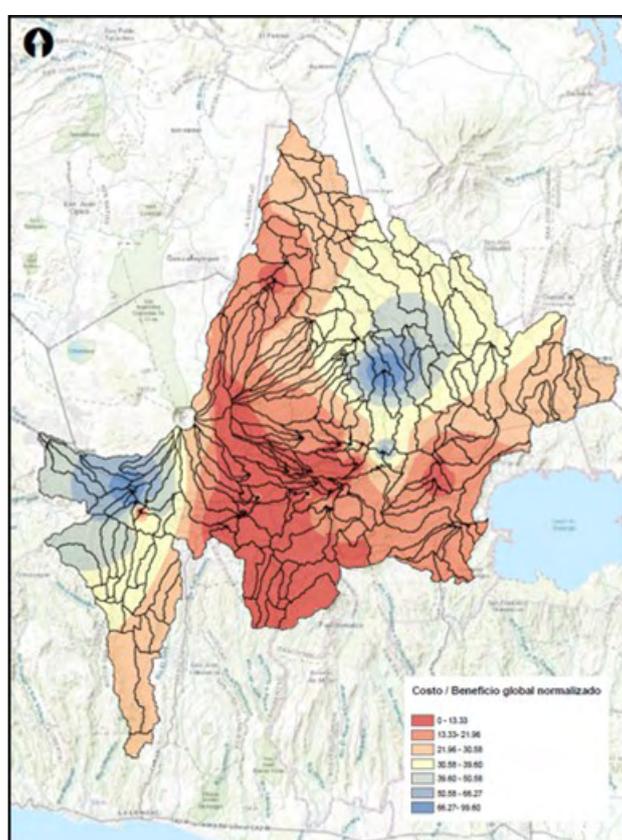


Figura 10. Relación costo/beneficio como criterio de priorización obtenida en el PM\_GESALAMSS

#### 4. CONCLUSIONES

El crecimiento urbano descontrolado del AMSS, que conlleva la ocupación e impermeabilización del territorio en la cabecera de cuenca del río Acelhuate, constituye el detonante fundamental de la problemática existente de peligrosidad de inundación.

Adicionalmente, la migración interna experimentada desde el mundo rural al ámbito

metropolitano en busca de oportunidades de mejora, desplaza a la población más desfavorecida a ocupar, entre otros espacios degradados, los reservados para el drenaje fluvial (figura 11).

En este contexto nace la necesidad de brindar soluciones al corto plazo que sean capaces de disminuir los caudales punta circulantes por los ríos y quebradas del AMSS, tales como las lagunas de laminación.

El presente artículo presenta los criterios hidrológico-hidráulicos, económico-financieros, socio-políticos y ambientales desarrollados en Vielca (2017), Blanco y Vila (2018) y en la elaboración del PM-GESALAMSS para la toma de decisiones y priorización de actuaciones encaminadas a la retención de aguas lluvias capaces de disminuir los caudales circulantes por los cauces del área de estudio.

Dado que el ámbito y los problemas abordados en el PM-GESALAMSS son mayores que los definidos en Vielca (2017), se requiere la adopción de medidas complementarias a las lagunas de laminación que resuelvan problemas

existentes en los sistemas tradicionales. Para ello se propone el desarrollo de SUDS y se establece el parámetro “volumen de detención” (en USD/m<sup>3</sup>) de cada uno de los sistemas planteados, como base para la priorización de las medidas a desarrollar a través de un análisis costo/beneficio de alternativas.

La laguna de laminación de Colonia Luz fue diseñada en Vielca (2017) y a la fecha de redacción del presente artículo está cerca de finalizar su etapa de construcción, siendo la primera en su especie en la región centroamericana.

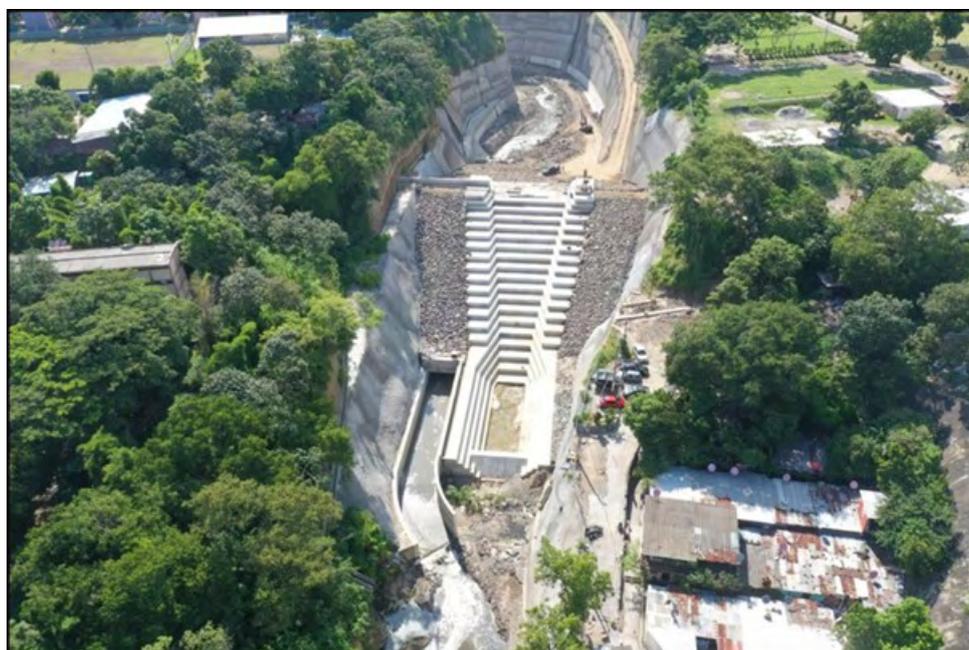


Figura 11. Estado actual de la laguna de laminación de Colonia Luz en San Salvador (vuelo dron de septiembre de 2019)

## REFERENCIAS

- Bertoni, J., Catalini, C. (2005). *Diseño de cinco prototipos de sistemas de infiltración de aguas lluvias para el manejo de la escorrentía superficial en el AMSS*. Contrato de Servicios No. FORGAES-054-2005-SER. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS). pp. 335
- BID, (2016). *Perfil de riesgo de desastre por inundaciones para El Salvador*. Banco Inter-americano de Desarrollo (BID). pp. 157
- Blanco P., Vila A. (2018). Proyecto de macrodrenaje de aguas pluviales en el Arenal de Monserrat, Área Metropolitana de San Salvador (El Salvador). *XI Jornadas Españolas de Presas (León, España)*. SPANCOLD Comité Nacional Español de Grandes Presas: 1347-55.
- CCAS, (2010). *Servicios de Consultoría para Apoyo en el Diagnóstico y la Elaboración de un Programa de Reducción de Vulnerabilidad en Quebradas y Ríos del AMSS*. Informe Final Componente hidrología e hidráulica\_v3. Corra Consulto-res Asociados, SA de CV. pp. 259

- CEPAL, (2011). *La economía del cambio climático en Centroamérica: Reporte técnico 2011*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). pp. 437
- CES-CLASS, (2000). *Estudio de factibilidad y diseño final de ingeniería del proyecto “obras de paso del sistema hidrográfico del Área Metropolitana de San Salvador”*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU). pp. 171
- Desinventar, (2019). *Corporación OSSO/ La Red/ UNISDR*, Colombia. <https://www.desinventar.org/es/>, e-mail: [desinventar@desinventar.org](mailto:desinventar@desinventar.org)
- Fernández-Lavado, C. (2010). *Caracterización de la inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador*. Programa IPGARAMSS-Geólogos del Mundo. pp. 153
- Harmeling, S. (2010). *Global climate change index 2011. Who suffers most from extreme weather events? Wheather-related loss events in 2009 and 1990 to 2009*. Germanwatch briefing paper. pp. 24
- Huet, L., Mena, M. (1999). *Diagnóstico del Drenaje Urbano en el Área Metropolitana de San Salvador*. Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID).
- Inypsa, (2018). *Elaboración del catastro físico y topográfico del macro y micro drenaje pluvial en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU).
- Lotti, C. y Associatti, (2002). *Diagnóstico y factibilidad del sistema secundario de drenajes de aguas lluvias en cuatro zonas críticas del Área Metropolitana de San Salvador y diseño final de la zona más crítica*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU). pp. 143
- MARN, (2012). *Escenarios de riesgo: Amenaza por inundación. Cuenca alta del río Acelhuate: Arenal Montserrat, Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, Quebrada El Garrobo*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Dirección General del Observatorio Ambiental. pp. 70.
- MARN, (2018). *Tercera comunicación nacional de Cambio Climático, El Salvador*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). pp. 221
- OPAMSS, (2016). *Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador*. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).
- SNET, (2019). Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). 20/09/2019. <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/select.php>, e-mail: [medioambiente@marn.gob.sv](mailto:medioambiente@marn.gob.sv)
- SWECO, (2003). *Plan maestro para drenaje de aguas lluvias en el Área Metropolitana de San Salvador*. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).
- Tucci, C. (2007). *Gestión de Inundaciones Urbanas*. Organización Meteorológica Mundial. pp. 317
- UNDAC, (2010). *Evaluación de la capacidad nacional para la respuesta a emergencias*. El Salvador. Equipo de Naciones Unidas de Evaluación y Coordinación de Desastres (UNDAC). pp. 77
- Vielca, (2017). *Proyecto de obras de amortiguamiento del macrodrenaje pluvial del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU).
- Youtube, (2019), ElSalvadorcom. *El Salvador*. 30/09/2019. <https://www.youtube.com/watch?v=03gm3L-2Wtw>, e-mail: [info@elsalvador.com](mailto:info@elsalvador.com).

*Como citar este artículo:*

Gómez Blanco, P., Fernández Martínez, L., Flores, Enrique, Hernández, O. (2019). Planteamiento del problema y propuesta de soluciones para abordar el desafío de la gestión de las aguas lluvias en el área metropolitana de San Salvador (AMSS), El Salvador. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 71-84. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-07



## Metodología para el diseño de sistemas de drenaje sanitario y pluvial

*Methodology for the design of sanitary and storm drainage systems*

Manuel M. Cabrera Delgadillo<sup>1\*</sup>, Guadalupe Sánchez Campos<sup>1</sup>,  
Juan Carlos Mejía Suárez<sup>1</sup>, Carmen Hernández Pastor<sup>1</sup>

Recibido: 19/08/2019

Aceptado: 10/09/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Se presenta el procedimiento de aplicación de un método propuesto para el dimensionamiento y diseño del drenaje sanitario y pluvial, mediante una secuencia de cálculo y su cuidado. Se busca incrementar la certidumbre de enterrar la tubería adecuada en suelos limo-arcillosos con baja resistencia a la compresión y alta deformación. Este incluye la valoración de requisitos y datos básicos de diseño, topografía y trazo, para el desarrollo del diseño hidráulico. Bajo consideración de las propiedades ingenieriles de las tuberías rígidas (Concreto) y flexibles (Plásticas), se da el paso A) Diseño hidráulico, que se verá afectado por la revisión del paso B) Análisis de hundimientos diferenciales del suelo al paso del tiempo, ante esta consideración, se propone revisar su funcionamiento, con el objeto de establecer una pendiente y geometría que se adecuen con la deformación estimada a futuro. En caso de requerirse se da el paso C) Revisión a presión interna, donde se establecen bases de diseño. En siguientes pasos D) Análisis de resistencia y capacidad de carga de la tubería, se revisa la resistencia de tubería rígida, y flexible. Se evalúa en E) Análisis sísmico, el desplazamiento axial de la tubería, condicionando el tipo de tubería a usar, finalmente los pasos F) Análisis de flotación. Análisis de compensación. En el apartado de resultados, se comenta la importancia y cuidados al proceso.

**Palabras clave:** hidráulica, tuberías, hundimientos, resistencia, aplastamiento, deformación, presión, sismo, flotación, compensación.

### Abstract

*The procedure for the application of a proposed method for the dimensioning and design of sanitary and rainwater drainage, by means of a calculation sequence and its care, is presented. The aim is to increase the certainty of burying the appropriate pipe in silty-clayey soils with low resistance to compression and high deformation. This includes the assessment of requirements and basic design data, topography and layout, for the development of the hydraulic design. Under consideration of the engineering properties of the rigid (Concrete) and flexible (Plastic) pipes, step A) Hydraulic design is undertaken, which will be affected by the revision of step B) Analysis of differential soil subsidence over time. In view of this consideration, it is proposed that their operation be revised, in order to establish a slope and geometry that is appropriate for the estimated future deformation. If required, step C) Internal pressure review is carried out, where design bases are established. In the following steps D) Analysis of resistance and load capacity of the pipe, the resistance of rigid and flexible pipe is reviewed. In E) Seismic analysis, the axial displacement of the pipe is evaluated, conditioning the type of pipe to be used, finally the steps F) Flotation analysis. Compensation analysis. In the results section, the importance and care of the process is commented on.*

**Keywords:** hydraulics, piping, sinking, resistance, compression, deformation, pressure, seismic, flotation, compensation.

1 WT Diseño Sustentable S.C. mcabrera@wtds.mx; gsanchez@wtds.mx; jcmejia@wtds.mx; chernandez@wtds.mx

## 1. INTRODUCCIÓN

Se presenta un desarrollo metodológico para proyectos de diseño de Sistemas de Drenaje Sanitario y Pluvial, derivado de un proceso continuo de evaluación de las mejores prácticas de diseño, esto se propone, debido a la importancia que deben darse a estos sistemas, pues desempeñan un papel fundamental en la protección de la vida y salud humana, además del resguardo al medio ambiente en las áreas urbanas, al ser usados como medio de desalojo de las aguas servidas y flujos pluviales en demasías.

Para describir la metodología propuesta, se presenta la aplicación de procedimientos y técnicas, para el cálculo y selección de tuberías para colectores sanitarios y pluviales, considerando las características geotécnicas del Valle de México, que significan un reto para todas las edificaciones e infraestructura necesaria para el desarrollo social y económico de sus habitantes.

La propuesta se apoya en criterios de desempeño y evaluación, que proporcionan la normatividad internacional ISO (*International Organization for Standardization*) y en algunos casos ASTM (*American Society for Testing and Materials o ASTM International*), que se usan también como referencia para el desarrollo de la normatividad en México, como las normas NOM (Normas Oficiales Mexicanas) y NMX (Normas Mexicanas), lo que da certeza en las adquisiciones públicas, al evitar la existencia de conflictos de interés, ante la intención de concurrir, el mayor beneficio para el desarrollo social y económico de los habitantes de zonas urbanas, con el menor costo posible de diseño, construcción, operación y mantenimiento durante la vida útil de los sistemas de alcantarillado.

El proceso de la secuencia propuesta, tiene el punto de control principal en la fase de Diseño Hidráulico, parte de este punto y conforme se evalúan los resultados se retorna a él, hasta concluir la secuencia con certitud. Cada fase con resultado positivo de su entregable (memoria de cálculo), confirma la validez y cumplimiento del objetivo de incrementar la certidumbre de usar la tubería adecuada al tipo de suelo. En especial la

metodología considera su aplicación en suelos limo-arcillosos, como los del Valle de México.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Antecedentes

Bajo el tradicional esquema de diseño y construcción, tan solo considerando materiales de conducción adecuados al funcionamiento hidráulico, es muy probable que el plazo de vida útil de los nuevos alcantarillados, coincida con el plazo de inversión, por lo que la rentabilidad de la inversión de capital se verá reducida o anulada. Es así que se debe considerar una infraestructura robusta con larga vida útil y con el menor costo posible. En ese sentido los materiales estandarizados responden a las actuales necesidades de resistencia y durabilidad, acompañados de innovadores procesos de construcción, que deben ser considerados desde el diseño. Es donde el conocimiento de la problemática, la reunión de la información pertinente al proyecto, la evaluación de soluciones por pasos y la verificación de resultados del proyecto, son cruciales para resolver un proyecto de infraestructura.

El suelo lacustre, característico del centro Valle de México, se compone de depósitos formados de manera predominante por partículas finas, limo y arcilla, tienen grandes contenidos de humedad los cuales llegan a un grado de saturación del 100%, tiene alta plasticidad (cuando el límite líquido es mayor al 50%), se caracterizan por su baja consistencia, baja capacidad de resistir carga, alta compresibilidad y alta deformación; características que son capaces de generar grandes asentamientos en las cimentaciones construidas sobre ellas y es un material impermeable. Los suelos arcillosos suelen hincharse cuando se exponen a la humedad (expansión de la arcilla) y se contraen cuando la humedad del suelo disminuye, esto representa un problema para las cimentaciones desplantadas en este tipo de suelo, ya que el suelo buscará separarse de la estructura al expandirse. Por lo que es importante considerar, el nivel de humedad del suelo donde se proyecte, lo que limita el tipo de cimentación para una tubería.

Se propone una secuencia de diseño al proyecto de drenaje que permita establecer de forma ordenada y eficiente la logística de las actividades. En la figura 1, se muestra el diagrama de la secuencia propuesta. El detalle de cada paso o fase se describe en adelante. La secuencia de cálculo y su cuidado, tiene el objetivo de incrementar la certidumbre de usar la tubería (Rígida o Flexible) de forma adecuada, para la construcción de un sistema de drenaje sanitario o pluvial.

## 2.2 Requerimientos de diseño

La supervisión y mantenimiento son una parte esencial en la operación del sistema de drenaje, es obligatorio en México, como en muchas partes del mundo, mantener la hermeticidad del sistema, que se prevé desde las etapas de diseño, construcción, y mantenerse durante su operación, conforme la norma oficial mexicana NOM-001-CONAGUA-2011, para evitar la infiltración de aguas subterráneas y ex-filtración de las aguas conducidas en el drenaje sanitario, definidas en calidad del agua en la norma NOM-002-SEMARNAT-1996; (SEMARNAT, 1998), considerando lo anterior, cualquier no cumplimiento de ambas normas, debido a desbordamientos o fugas del alcantarillado sanitario, debe evitarse, por los altos riesgos que representan a la salud y al medio ambiente, por tratarse de emisiones de aguas residuales sin tratar. Además, es de vital importancia eliminar todo tipo de riesgos que puedan generar dislocaciones, separación de tuberías, rupturas, que en consecuencia produzcan socavones que ponen en riesgo la vida y los bienes públicos y privados.

## 2.3 Datos básicos de diseño y topografía

Como es tradicional, el proyecto parte de la información topografía del entorno urbano, sobre el que se desarrollará la red de atarjeas o colector, en un plano de desarrollo geométrico e hidráulico, indicando por tramos, diámetro, longitud del colector, pendiente, material (rugosidad), niveles de base y clave de tubería, con referencia superficial o del terreno, indicados en los pozos de visita; además de señalarse la cuenca hidrológica urbana, que identifique de forma clara o aceptable, las zonas de influencia del funcionamiento hidráulico.

Deben cuantificarse el valor medio de aportación, tipo y cantidad de población que sirve el colector, ente otra información, que permita calcular la cantidad de aguas sanitarias producidas en condiciones actuales y estimadas a un horizonte de vida útil o planificado a la saturación, en correspondencia con la duración de los materiales a utilizar en su construcción; además evaluar la recepción de las aguas de escurrimiento por lluvia, lo que permite contemplar el gasto y condiciones hidráulicas de operación.

## 2.4 Propiedades ingenieriles de las tuberías

Se debe observar para la selección de tipos y materiales de tuberías, la normatividad aplicable al diseño de alcantarillados sanitarios y pluviales, que tiene como base en México la NOM-001-CONAGUA-2011, que entre sus objetivos se destaca [sic] “Establecer especificaciones mínimas de desempeño para los productos que integran los sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario, para asegurar la hermeticidad de éstos a largo plazo”, en consecuencia, se emplearán materiales y tuberías certificadas NMX, seguidas de ISO y con algunas excepciones ASTM y AWWA.

## 2.5 Tuberías y estructuras de concreto

La destrucción del concreto en los sistemas de alcantarillado, tiene un origen debido al ácido sulfúrico que producen ciertas bacterias cuando el oxígeno que se encuentra en la tubería tiende a agotarse. El Diseño por Durabilidad, se encarga de corroborar la capacidad que tienen las estructuras de soportar durante su vida útil, las condiciones físicas y químicas a las que están expuestas y es requisito establecido en la NTC-RSEE del RCCDMX (GOCDMX, 2017). Bajo la perspectiva de resistencia y durabilidad se consultan las normas mexicanas NMX-C-402-ONNCCE-2011 (ONNCCE, 2011) para tuberías de concreto reforzado y NMX-C-155-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014) para las especificaciones del concreto, considerando estas; los elementos y tuberías de concreto a emplear en el drenaje, deberán ser manufacturados con Concreto con resistencia a la compresión mayor a los 34.5 MPa ( $350 \text{ kg/cm}^2$ ) con Cemento tipo CPP-RS, para tuberías Grado 3.

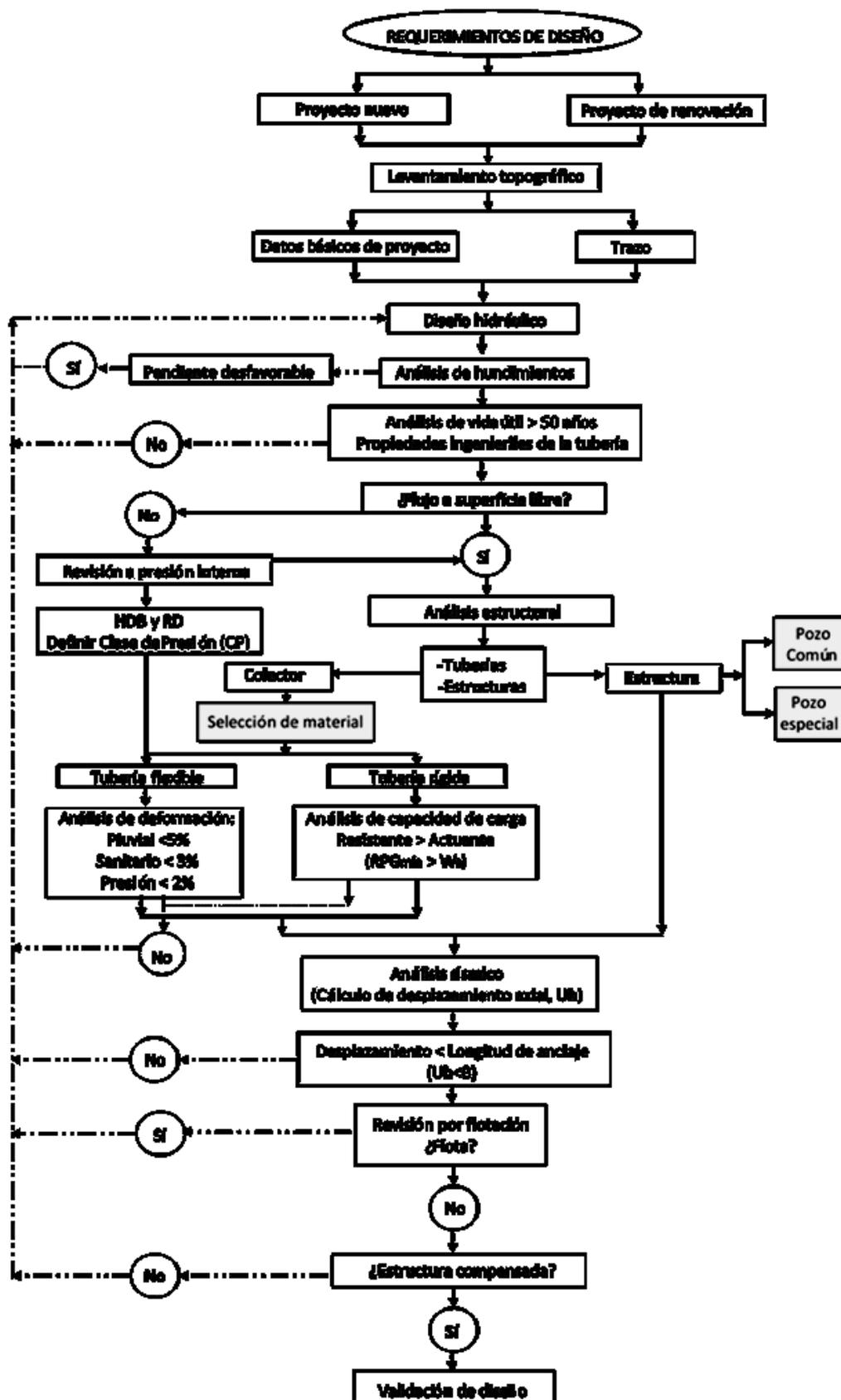


Figura 1. Esquema del proceso para el diseño de sistemas de drenaje sanitario y pluvial

Resistencia del concreto 34.5 MPa (350 kgf/cm<sup>2</sup>) y Grado 4 Resistencia del concreto 41.4 Mpa (420 kgf/cm<sup>2</sup>), siendo esto último la clasificación de la tubería con base en su capacidad de resistir cargas externas. Las anteriores especificaciones dan certeza sobre una esperanza de vida de las tuberías de concreto en 50 años. Es importante recabar de las especificaciones de la normatividad, el valor de Resistencia a la Primera Grieta (RPG), resultado de la Prueba de los Tres Apoyos, para considerar los valores en los cálculos de Resistencia al Aplastamiento para cada tubo a estudiar. Como alternativa de utilización, se tiene la tubería de concreto reforzado con revestimiento interior (CRRI). Esta tubería se fabrica bajo las mismas especificaciones contenidas en las tablas de tubo de concreto reforzado, siendo necesarios los Grados 3 y 4, con un revestimiento interior de PVC o PEAD. El revestimiento le otorga al concreto una protección adicional y permanente, cuando por proyecto se considere que la tubería puede estar expuesta a ambientes altamente corrosivos, además de mejorar el coeficiente de rugosidad.

## 2.6 Tuberías Plásticas

Como alternativa a los ataques químicos a los que está expuesta la tubería sanitaria, se tienen las tuberías plásticas. Bajo la perspectiva de resistencia, durabilidad, diámetro aplicable y estructuración, se consultan las normas mexicanas e internacionales siguientes: NMX-E-230-CNCP (CNCP, 2011) para tubos de pared estructurada anularmente de PCV-E; NMX-E-241-CNCP (CNCP, 2013) para tubos de pared corrugada PEAD-C; ISO 21138-3 (ISO, 2007) para tuberías de superficie externa estructurada o corrugada, tipo B, de PVC-E, de polipropileno (PP), PEAD-C y PEAD-E, y la extranjera ASTM F894 (ASTM, 2019) para tuberías de PEAD-E de espesor variable en pared interna lisa y

estructurada en externa para diámetros de 600 mm a 3,000 mm. Debe resaltarse de las tuberías plásticas, la inclusión en especificaciones de la prueba NCLS (*Notched, Constant Ligament-Stress*), con base en los resultados del ensayo NCLS se establece de 50 a 100 años la vida útil para las tuberías de PEAD-C y PEAD-E. Las tuberías PVC-E y PEAD-C, no tienen valor de HDB (ver apartado, revisión a presión interna), por no especificar resistencia de presión en su uso; contrariamente la tubería PEAD-E (estructurada) de estándar ASTM F894, posee HDB de 1.03MPa, por lo que puede ser aplicada en condiciones que exijan baja carga de presión. Un importante valor de especificación de las tuberías plásticas es la Rigidez de la tubería (PS), que es una medida de la resistencia a la deformación anular bajo una fuerza externa, requerido para cálculos de Resistencia al Aplastamiento.

## 2.7 Trazo geométrico

Se debe con el trazo favorecer que el flujo sea por gravedad, con especial atención en la ubicación de los pozos de visita en cruces de calles o para dividir tramos que excedan la longitud recomendada por labores de mantenimiento e inspección, además donde se efectuarán conexiones con otros tubos, cambios de dirección, cambio de pendiente, cambio de diámetro, y cambios de material de tuberías.

## 2.8 Diseño Hidráulico

En un sistema de drenaje solo debe de presentarse flujo a superficie libre, estado que cumple un flujo a gravedad y ventilado. Para simplificar el diseño, se consideran condiciones de flujo establecido y en estado permanente, el estado de flujo uniforme es el criterio que rige el área de la sección hidráulica mínima requerida, bajo la igualdad siguiente.

$$\frac{Q_n}{S^{1/2}} = ARh^{2/3} \quad (1)$$

donde

Q, es el gasto en m<sup>3</sup>/s

N, es el coeficiente de rugosidad de Manning en s/m<sup>1/3</sup> (0.010 para PEAD-C)

S, es la pendiente (menor a 4%)

A, es el área en m<sup>2</sup>

Rh, es el radio hidráulico, en m

Se deben de cumplir dos condiciones importantes:

- Diseño recomendado al 80% de la capacidad hidráulica ( $y=0.80 D$ ), para drenaje sanitario, en donde “y” es tirante y “D” diámetro, permitiendo el flujo de gases al exterior y el acceso de presión atmosférica, o Diseño al 96% ( $y=0.96 D$ ) de llenado para drenaje pluvial.
- Velocidad permisible (v): mínima (0.6 m/s) y máxima (5.0 m/s) para tuberías plásticas.

Las variables a determinar a través de la ecuación (1) serán pendiente y diámetro. Debe prestarse especial atención en la aplicación del valor del coeficiente de rugosidad n de Manning, pues recientes investigaciones dan cuenta de una variación de su valor, en dependencia con el material, diámetro de tubería y velocidad del flujo, por lo que no debe considerarse como constante durante su uso y preverse su comportamiento, principalmente a velocidades menores a 2 m/s (Cabrera, 2012). En este paso conviene el uso de software de simulación matemática, para favorecer la revisión de los resultados y atender de forma adecuada y pronta, la solicitud de cambios en geometría, solicitados por los cambios que procuren las siguientes revisiones.

$$Cbp_p = Cbp_i - (ha * n) \quad (2)$$

donde

$Cbp_p$ , es la Cota de brocal o plantilla obtenida de la proyección, en msnm

$Cbp_i$ , es la Cota de brocal o plantilla inicial, en msnm

ha, es el valor de hundimiento anual del punto analizado, en m

n, es el número de años de la proyección

### 2.10 Revisión a presión interna

El drenaje pluvial y sanitario es restringido a un flujo como máximo a tubo lleno de sus tuberías, sin embargo, si los requerimientos de diseño o las probables condiciones de operación de los conductos, condicionan una carga de presión, es decir, niveles de operación de flujo entre la clave (nivel superior interior) de la tubería y la superficie del terreno, sin desbordar; o por impulsión del flujo mediante equipo de bombeo. En esas circunstancias, las tuberías de drenaje tradicionales no son aplicables, debido a su limitada resistencia a la presión interna, a tan

### 2.9 Análisis de hundimientos

Después de una primera solución hidráulica, es importante considerar los hundimientos regionales diferenciales y el efecto sobre la pendiente propuesta, generando un principal escenario posible de tendencia de deformación lineal, para 30 o más años, a lo largo del trazo de proyecto, con la intención de proponer un desnivel inicial y predecir la deformación en el perfil de diseño, con el objetivo de mantener un perfil de horizonte de deformación futura favorable al sentido del escurrimiento. Debido a su importancia, la autoridad gubernamental de la Ciudad de México, mantiene actualizado un mapa de hundimiento del suelo a través de los Atlas de riesgos de la CDMX, que representa las zonas donde el suelo tiene un movimiento vertical lento, debido a las condiciones de compresibilidad propias del suelo, producidas principalmente por la intensidad en la extracción del agua del subsuelo, que es considerado para valorar el desnivel a futuro, que afecte el perfil del colector o la pendiente de operación, lo que define el efecto a futuro del comportamiento hidráulico. Los niveles de brocal y plantilla proyectados a un horizonte futuro, se obtienen de aplicar la siguiente ecuación:

solo la prueba de hermeticidad hidrostática, comúnmente establecida en 0.05MPa (0.5bar) o neumática a 0.03MPa (0.3bar) mantenida durante 15 minutos, (CONAGUA, 2012); por lo que se puede optar por tuberías con Base de diseño Hidrostático (HDB), como parámetro de resistencia a la presión interna sostenida de trabajo. La capacidad de resistencia a presión interna de la tubería o CP, se puede calcular a partir de la HDB en función del espesor de pared (e), diámetro de la tubería (D), y el factor de diseño (FD) adecuado. Las ecuaciones aplicables se muestran a continuación:

Ecuación en términos del diámetro exterior y el espesor de pared.

$$CP = \frac{2e(HDB)(FD)}{De - e} \quad (3)$$

Ecuación en términos del diámetro interior y el espesor de pared.

$$CP = \frac{2e(HDB)(FD)}{D + e} \quad (4)$$

Donde

CP, es la Clase de Presión, en MPa

HDB, es la base de diseño hidrostático, en MPa el PVC debe tener un HDB de 27.58 MPa (4,000 psi) (AWWA, 2002), mientras que el PEAD tiene un HDB de 11.03 MPa (1600 psi) (AWWA, 2006)

FD, es el Factor de Diseño con valor de 0.5 para ambos materiales ( $FD = 1/FS$ ), adimensional

FS, es el Factor de Seguridad, adimensional

De, es el Diámetro exterior, en m

e, es el Espesor de pared, en m

D, es el Diámetro interior, en m

Debe identificarse la presión operativa máxima esperada y sostenida, definida como la Presión de Trabajo (PT), aplicada a la tubería con inclusión de las sobrepresiones recurrentes

(SPR) y ocasionales (SPO). En normas (GOCDMX, 2017), se prevé el uso de Factores de Carga, conforme la combinación de acciones.

Combinaciones de acciones permanentes y variables, multiplicadas por un factor de carga de 1.5

$$P_T(1.5) \geq CP \quad (5)$$

Combinaciones de acciones permanentes, variables y accidentales, multiplicadas por un factor de 1.1

$$P_T(1.5) \leq CP \quad (6)$$

Se considerará para diseño la más desfavorable.

$$(P_T + SP_O)(1.1) \leq CP \quad (7)$$

Considerando tuberías enterradas hasta 8 m de profundidad, y con requerimientos de resistencia a baja presión, es común solicitarlas para resistir una PT de 98 kPa (10 mca), con CP de trabajo 147 kPa (15 mca).

### 2.11 Análisis de resistencia y capacidad de carga de la tubería.

En el estudio de tipo de tubería a emplear se deben distinguir dos tipos, tuberías rígidas (Concreto) o flexibles (Plásticas). Es un hecho

que los tubos flexibles proporcionan una rigidez significativamente menor en comparación con las tuberías rígidas (Concreto); sin embargo, se comportan notablemente bien cuando son enterradas en el suelo, confinadas con materiales granulares.

### 2.12 Tubería rígida (concreto)

El análisis de capacidad de carga de la tubería, contempla. Carga actuante:

$$W_a = \frac{(W_c + W_L)FS}{F_L} \quad (8)$$

Donde

$W_a$ , es la carga actuante, en kg

$W_c$ , es la carga muerta sobre la tubería, en kg

$F_L$ , es el factor de lecho, que depende del tipo de cimentación y acostillado

FS, es el factor de seguridad, 1 para tubería de concreto reforzado.

Finalmente se compara la carga actuante contra la Resistencia a la Primera Grieta (RPG) (ONNCCE, 2011). Si el valor de la carga

actuante es menor al valor de la resistencia de la tubería, entonces se entiende que la tubería resiste la carga a la que está sometida.

$$RPG_{MIN} \geq W_a = \frac{(W_c + W_L)FS}{F_L} \quad (9)$$

### 2.13 Tubería flexible (plástica)

La revisión por resistencia estructural se basa en tres parámetros que son esenciales en el análisis y diseño de cualquier instalación de un conducto flexible: 1) Cargas muertas debido a la profundidad del relleno y cargas vivas debido al

tránsito de vehículos, 2) Módulo de reacción del suelo y 3) La rigidez de la tubería. Estos tres elementos se sintetizan en la ecuación conocida como de IOWA Modificada (Moser, 2008), y establece que:

$$\frac{\Delta y}{D_n} = \frac{(DL(W_c) + W_L)K}{(0.149PS + 0.061E') * 101.97} \quad (10)$$

Donde

$\Delta y$ , es la deformación del diámetro, en m

DL, es el factor de deflexión de retraso, constante adimensional con valor de 1.5

$W_c$ , es la carga muerta sobre la tubería, en kg

$W_L$ , es la carga viva sobre la tubería, en kg

K, es el coeficiente de plantilla, adimensional

PS, es la rigidez de la tubería, en kPa

$E'$ , es el módulo de reacción del suelo (resistencia del suelo al aplastamiento), en kPa

Se tiene que evitar el aplastamiento de la tubería por acción de cargas externas, a través de valuar dos parámetros importantes,  $E'$  que se define con las características de resistencia mecánica del material de suelo usado en el acostillado del tubo

y PS definido en la normatividad de la tubería, por pruebas de aplastamiento o en su defecto, mediante la siguiente expresión en función del RD.

$$PS = \frac{F}{\Delta y} = 4.47 \frac{E}{(RD - 1)^3} \quad (11)$$

Donde

E, es el Módulo de elasticidad de la tubería, en kg/cm<sup>2</sup>

### 2.14 Análisis sísmico

El análisis sísmico que se propone, se determina a partir del método pseudo-estático, mismo que

evalúa desplazamientos axiales del suelo y los transfiere a la tubería, la evaluación se realiza a partir de una comparativa, entre el

desplazamiento axial máximo de la tubería ( $U_p$ ) producto del sismo, contra la longitud de acoplamiento espiga-campana de la tubería, denominado “desplazamiento permitido (B)”.

La obtención de los desplazamientos axiales de la tubería, parte de ubicar la zona sísmica (México) del sitio en análisis con el programa o software SASID (ISCCDMX, 2019), recuperándose los valores de periodo de la capa

superficial del suelo ( $T_s$ ) y el coeficiente de la proporción de la aceleración ( $a_0$ ) de la gravedad, de acuerdo con el espectro sísmico de diseño evaluado con el programa. También, se requiere determinar la profundidad del estrato duro ( $H_s$ ), mediante un análisis geotécnico.

Se calcula el desplazamiento promedio de la junta “Up” con la ecuación siguiente:

$$U_p = a_1 U_h \quad (12)$$

Donde

$U_p$ , es el desplazamiento axial de la tubería, en m

$a_1$ , es el Coeficiente de transferencia de deformación axial (que está en función del área transversal y módulo de elasticidad de la tubería, así como del peso volumétrico del suelo y la longitud de la onda sísmica ( $\lambda^*$ ))

$U_h$ , es el desplazamiento axial del terreno, en m, que se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$U_h = \frac{T_s^2}{4\pi^2} a_0 g \cos \frac{\pi H_c}{2H_s} \quad (13)$$

Donde

$U_h$ , es el desplazamiento axial del terreno, en m (CFE, 2015)

$H_c$ , profundidad de enterramiento, m

$a_0$ , es el coeficiente adimensional de la proporción de la aceleración gravitacional, adimensional

$g$ , es la aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$

$H_s$ , la profundidad del estrato duro, m

Este análisis permitirá evaluar el riesgo por desacoplamiento de los tubos, y tomar las medidas necesarias en la selección del tipo de unión de la tubería, como parte de un diseño integral.

### 2.15 Análisis de flotación

Por lo general, la flotación no es una consideración de diseño para tuberías enterradas donde la tubería se encuentra llena o casi llena

de líquido o donde el agua subterránea está siempre por debajo de la tubería enterrada; sin embargo, este problema puede causar una reducción significativa del soporte del suelo alrededor de la tubería y permitir que la tubería se flexione por la presión hidrostática externa, por lo que debe de revisarse. En el estudio por flotación, se considerará una posición conservadora del nivel freático y se establece el siguiente procedimiento de revisión:

$$F_{VA} < P_T + P_{SS} + P_{SD} + P_{LC} \quad (14)$$

Donde

$F_{VA}$ , es la fuerza vertical ascendente o fuerza de flotación, en kg/m

$P_T$ , es el peso de la tubería, en kg/m

$P_{SS}$ , es el peso del suelo saturado, en kg/m

$P_{SD}$ , es el peso del suelo seco, en kg/m

$P_{LC}$ , es el peso del líquido contenido dentro de la tubería, en kg/m

La revisión por flotación se realiza a partir de comprender la fuerza vertical ascendente y balancearla o contrarrestarla con la carga de suelo de relleno de la zanja por arriba del lomo de tubería, contra la fuerza de flotación; tal relación debe ser mayor a 1.5 para mantener un Factor de Seguridad Mínimo.

### 2.16 Análisis de compensación

Este proceso consiste principalmente en el análisis de asentamientos diferenciales causados por someter el suelo nativo a esfuerzos mayores a los determinados por su resistencia mecánica. Además, sirve para garantizar un

comportamiento adecuado de la estructura de drenaje, frente al problema de asentamientos, evaluándose en consecuencia si el enterramiento y tubería, serán expuestos a propiciar hundimiento o levantamiento.

Según el incremento neto de carga aplicado al suelo del conjunto suelo-tubería o suelo-estructura, resulte positivo, nulo o negativo, la cimentación se denomina parcialmente compensada, compensada o sobre-compensada, respectivamente.

El cálculo del peso de la estructura, se obtiene mediante la expresión siguiente.

$$W_e = C_v + C_m \quad (15)$$

Donde

$W_e$ , es el peso de la estructura, en kg

$C_v$ , es la carga viva, en kg

$C_m$ , es la carga muerta, en kg

El peso del suelo desplazado se obtiene con la siguiente ecuación.

$$W_s = V * \gamma_s \quad (16)$$

Donde

$w_s$ , es el peso suelo desplazado, kg

$V$ , es el volumen de suelo desplazado, en  $m^3$

$\gamma_s$ , es la densidad del suelo desplazado, en  $kg/m^3$

Se obtiene el incremento de carga y se verifica el tipo de compensación.

$$\Delta W = W_e - W_s \quad (17)$$

Se definen como cimentaciones compensadas, aquellas en las que se busca reducir el incremento neto de carga aplicado al subsuelo, mediante excavaciones del terreno y uso de un cajón desplantado a cierta profundidad.

### 3. RESULTADOS

A continuación, se hace mención de los resultados más destacados que arroja la metodología:

- Certidumbre sobre el funcionamiento hidráulico a largo plazo, considerando la deformación diferencial del suelo por hundimientos, en la formación a futuro, de un perfil longitudinal, favorable al sentido del escurrimiento.
- Selección adecuada de tuberías, en previsión de requerimientos de resistencia a cargas internas de presión y externas por enterramiento en suelos limo-arcillosos con baja resistencia a la compresión.

- Especial cuidado en la previsión de deformaciones diametrales, estimadas ante cargas externas, que no superen el valor de 2% para tuberías sometidas a presión, hasta 3% para tuberías plásticas aplicables al drenaje sanitario y menores al 5% para drenaje pluvial,
- Atender la normatividad nacional e internacional, para la selección de materiales que garanticen por lo menos una vida útil de 50 años, para incremento del beneficio económico y social.
- El análisis sísmico básico, servirá de apoyo para la selección de tuberías, al comparar la longitud de unión campana-espiga contra los desplazamientos axiales promedios y por tanto evitar en lo posible desacoplamientos o dislocamientos de uniones, privilegiando el uso de campanas largas o la ventaja que proveen las tuberías de PEAD de unión por termo fusión, con alta resistencia a la tensión y desplazamientos.
- Las revisiones finales por flotación y compensación, ayudarán a la estabilidad estructural entre tuberías, estructuras y suelo, evitando los defectos por dislocaciones.

#### 4. DISCUSIÓN

El servicio de saneamiento tiene como principal objetivo brindar a la población el desalojo de las aguas sanitarias y pluviales de manera segura; por lo que resulta de gran importancia el diseño apropiado del drenaje, considerando el mayor número de variables que pudieran afectar su funcionamiento, resistencia y estabilidad estructural, tanto a corto como a largo plazo,

#### REFERENCIAS

- ASTM, (2019). ASTM F894. *Standard Specification for Polyethylene (PE) Large Diameter Profile Wall Sewer and Drain Pipe*. West Conshohocken, Pensilvania, USA.
- AWWA, (2002). *Manual M23 PVC Pipe - Design and Installation*, Second Edition, American Water Works Association, Denver, CO, USA.
- AWWA, (2006). *Manual M55 PE Pipe - Design and Installation*, First Edition, American Water Works Association, Denver, CO, USA.

incluso se recomienda, no limitarse los análisis expuestos en este trabajo, esto mejorará las prácticas y conocimientos de la ingeniería, en beneficio a la salud humana y protección de los acuíferos que proveen del recurso hídrico a la población, además de prevenir daños que pudiera ocasionar la falla del sistema de drenaje. Cada paso sorteado de forma ordenada y asertiva con apoyo de su memoria de cálculo respectiva, darán seguridad y forma a los entregables de proyecto.

#### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante y debe promoverse, la revisión del funcionamiento hidráulico inicial y con un horizonte de pronóstico de vida útil, considerando los hundimientos diferenciales del suelo y sismo, para la especificación de materiales a emplear en la plantilla y acostillado, que darán soporte estructural a las tuberías; así también su revisión por compensación y flotación para garantizar el comportamiento adecuado de cimentación, que evite asentamientos diferenciales del suelo nativo, causados por esfuerzos mayores a los determinados por su resistencia mecánica.

El proceso y los elementos de cálculo anteriores, se aplican con el fin de extender la vida útil de los sistemas de drenaje pluvial y sanitario. Los beneficios se verán reflejados en una infraestructura con certidumbre sobre su resiliencia, economía en el largo plazo y seguridad a la población, bajo la ejecución de un proyecto con apego a: normas establecidas, prácticas aceptadas de ingeniería y desarrollos tecnológicos disponibles.

- Cabrera, M. (2012), *Dinámica del coeficiente de rugosidad de Manning para tuberías de PEAD Corrugado*, XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Asociación Mexicana de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México.
- CFE, (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles - Diseño por Sismo*, CFE-III, D.F. México.
- CNCP, (2011). NMX-E-230-CNCP-2011 “*Tubos de poli (cloruro de vinilo) (PVC) sin plastificante de pared estructurada anularmente con junta hermética de material elastomérico para drenaje pluvial y sistemas de alcantarillado sanitario- Serie métrica – Especificaciones y métodos de ensayo*”. D.F. México, Publicación DOF 21 de octubre de 2011.
- CNCP, (2013). NMX-E-241-CNCP-2013 “*Industria del plástico-Tubos de polietileno de alta densidad (PEAD) de pared corrugada con junta hermética de material elastomérico, utilizados en sistemas de alcantarillado sanitario- Serie inglesa- Especificaciones y métodos de ensayo*”. D.F. México, Publicación DOF 21 de junio de 2013.
- CONAGUA, (2012). NOM-001-CONAGUA-2011, *Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba*. D.F. México, Publicación DOF 9 de febrero de 2012.
- GOCDMX, (2017). Gaceta oficial de la CDMX. *Normas Técnicas Complementarias para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE-17)* (online). [Consultado el 15 de mayo de 2019]. Disponible en: <http://www.smie.org.mx/layout/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-complementarias-ciudad-mexico-2017.pdf>
- ISCCDMX, (2019). *Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México Normas Técnicas Complementarias y Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID)*, (online). [Consultado el 15 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://www.isc.cdmx.gob.mx/servicios/servicio/normas-tecnicas-complementarias-y-sasid>
- ISO, (2007). ISO 21138-3. *Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage -- Structured-wall piping systems of unplasticized poly (vinyl chloride) (PVC-U), polypropylene (PP) and polyethylene (PE) - Part 3: Pipes and fittings with non-smooth external surface, Type B*. Vernier, Geneva, Switzerland.
- Moser, A., Folkman, S. (2008), *Buried Pipe Design*, Mc Graw Hil, USA. DOI: 10.1036/007147689X.
- ONNCCE, (2011). NMX-C-402-ONNCCE-2011, “*Industria de la construcción-Tubos de concreto reforzado con junta hermética para alcantarillado sanitario y drenaje pluvial-Especificaciones y métodos de ensayo*”. D.F. México, Publicación DOF 27 de octubre de 2011.
- ONNCCE, (2014). NMX-C-155-ONNCCE-2014, “*Industria de la Construcción-Concreto hidráulico– dosificado en Masa-Especificaciones y Métodos de Ensayo*”. D.F. México, Publicación DOF 26 de septiembre de 2014.
- SEMARNAT, (1998). NOM-002-SEMARNAT-1996, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y del tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano y municipal*. D.F. México, Publicación DOF 6 de abril de 1998.

*Como citar este artículo:*

Cabrera, M., Sánchez, G., Mejía, J., Hernández, C. (2019). Metodología para el diseño de sistemas de drenaje sanitario y pluvial. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 85-96. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-08



## Propuesta metodológica y elaboración de índices de riesgo de servicios públicos en un barrio popular de la ciudad de Buenos Aires

*Methodological proposal for public services risk indices in an informal neighborhood in Buenos Aires city*

María Eva Koutsovit<sup>1\*</sup>, Matías Goyeneche<sup>2</sup>

Recibido: 15/06/2019

Aceptado: 02/09/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Este artículo presenta el desarrollo y los resultados de la campaña de relevamiento de los servicios públicos de agua, saneamiento y electricidad en el barrio popular Villa 21-24 de la ciudad de Buenos Aires, Argentina. El punto de partida de la campaña fue un episodio de contaminación del agua corriente en varias manzanas del barrio, ocurrido en enero de 2019, lo que llevó a plantear un relevamiento extensivo del estado de los sistemas de agua, saneamiento cloacal y desagües pluviales del barrio, abordando la problemática de manera integral y enfocando en el riesgo hídrico-sanitario debido a la provisión no segura de agua potable y al saneamiento cloacal y desagües pluviales deficientes. En primera instancia, se planteó un relevamiento a nivel de las manzanas del barrio, mediante una encuesta domiciliaria especialmente diseñada que incluyó consultas sobre el estado de los servicios públicos mencionados y agregando el servicio de electricidad. A partir de los datos del relevamiento, se construyeron índices de riesgo hídrico-sanitarios y eléctricos georreferenciados a nivel de manzana, con el objetivo de elaborar un diagnóstico de la problemática, identificar los sectores más críticos y establecer prioridades de intervención. En una segunda instancia, dado que la presión insuficiente es un factor clave para el riesgo de contaminación del agua de red, se realizó una campaña de medición de presión en la red de agua interna del barrio, en la que se realizaron 110 mediciones, que demostraron que la presión en la red interna del barrio es en promedio 5 veces menor a la estipulada por el marco regulatorio de la empresa prestadora del servicio de agua y saneamiento en la ciudad de Buenos Aires. La campaña finalizó con la presentación en la Legislatura de la Ciudad de Buenos Aires de los resultados de los relevamientos y mediciones y los índices de riesgo asociados, y el planteo de una serie de propuestas a las autoridades para reducir y mitigar los riesgos hídrico-sanitario y eléctrico en el barrio.

**Palabras clave:** Infraestructura sanitaria, infraestructura eléctrica, barrios populares, índices de riesgo.

### Abstract

*This article presents the development and results of the survey campaign of public water, sanitation and electricity services in the popular neighborhood of Villa 21-24 in the city of Buenos Aires, Argentina. The starting point of the campaign was an episode of contamination of the running water in several blocks of the neighborhood, in January 2019, which prompted the necessity of an extensive survey of the state of the water, sewerage and storm drainage systems of the neighborhood, approaching the problem in an integral way and focusing on the sanitary risk due to the unsafe provision of drinking water and deficient sewage sanitation and storm drainage. First, a household survey was carried out inquiring on the state of the aforementioned public services and the electricity service. Based on the data from the survey, sanitary and electrical risk indicators were geo-referenced and aggregated at block-level, with the aim of developing a diagnosis of the problem, identifying the most critical sectors and establishing priorities for intervention. Second, given that insufficient pressure is a key factor for the risk of pollution of the water network, a pressure measurement campaign was carried out in the neighborhood's internal water network, and 110 measurements were made, which showed that the pressure on the internal network of the neighborhood is on average 5 times lower than that stipulated by the regulatory framework of the company providing the water and sanitation service in the city of Buenos Aires. The campaign ended with the presentation of the results of the surveys and measurements and the associated risk indexes in the Legislature of the City of Buenos Aires, and the presentation of a series of proposals to the authorities to reduce and mitigate the water-sanitary risks and electric in the neighborhood.*

**Keywords:** Sanitation infrastructure, electric infrastructure, informal neighborhoods, risk indices.

1 Cátedra de Ingeniería Comunitaria, Departamento de Hidráulica e Instituto de Ingeniería Sanitaria (Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires), Argentina, mevakoutsovitis@yahoo.com.ar

2 Cátedra de Ingeniería Comunitaria, Departamento de Hidráulica (Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires), Argentina, matiasgoyeneche@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

El barrio Villa 21-24 es un barrio popular de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ubicado en la Comuna 4 al sur de la Ciudad, a la vera del río Riachuelo y con ochenta años de historia, en el que actualmente viven unas 45,000 personas y que no cuenta con servicios públicos formales, como agua potable segura, saneamiento cloacal, tendido eléctrico seguro y gas de red. En el caso del agua y el saneamiento cloacal, si bien la empresa AySA S.A. tiene a su cargo desde el año 2006 la prestación de este servicio en la Ciudad de Buenos Aires y las villas de la ciudad se encuentran dentro de su área de concesión, en los hechos ésta únicamente presta el servicio hasta las periferias de las mismas (Koutsovitis y Baldiviezo, 2015).

A mediados de enero del 2019, se detectó un fuerte olor cloacal en el agua corriente en numerosas viviendas de las Manzanas 24, 25 y 29 del barrio. El 23 de enero, convocada por la Junta Vecinal (cuerpo electivo representante de los vecinos frente al Gobierno de la Ciudad en los procesos de integración social y urbana de los barrios y asentamientos), la Cátedra de Ingeniería Comunitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires acudió a constatar la calidad del agua de consumo. Fueron entrevistadas familias afectadas, se constató la presencia de olor fecal en el agua corriente de varias viviendas y se tomaron muestras del agua de consumo que fueron analizadas en un laboratorio especializado. La totalidad de las muestras de agua analizadas se encontraban contaminadas bacteriológicamente y no eran potables.

Según los testimonios de las familias, no se trató de un hecho aislado, ya que es frecuente que de las canillas de los hogares no salga agua o el agua que sale tenga olor cloacal, color amarillo y sedimentos, entre otras características no deseadas. Con el correr de los días el olor fecal en el agua de consumo se fue extendiendo a otros sectores del barrio (Manzanas 16, 26, 27, 28).

La Cátedra de Ingeniería Comunitaria elaboró un Informe Técnico el 30 de enero de 2019, informó los resultados a la Junta Vecinal, a las familias afectadas, a los organismos competentes e inició

un expediente administrativo en el Gobierno de la Ciudad. El Informe incluía un conjunto de recomendaciones a los organismos para, en primer lugar, garantizar la salud de los habitantes del barrio, determinar las causas de la contaminación bacteriológica e implementar acciones para controlar la calidad del agua consumo.

Durante las visitas al barrio y las reuniones con miembros de la Junta Vecinal y vecinos, el riesgo eléctrico también se presentó como problemática, debido a la precariedad del tendido eléctrico y de las instalaciones domiciliarias combinada con las inundaciones frecuentes.

A raíz de la situación descripta, durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo la Junta Vecinal del barrio, la Fundación TEMAS y la Cátedra de Ingeniería Comunitaria de la UBA llevaron adelante un relevamiento comunitario de servicios públicos que incluyó un mapeo detallado de la problemática sanitaria y eléctrica utilizando encuestas y la determinación de la presión del agua en las redes de abastecimiento.

Los objetivos del relevamiento fueron la elaboración de indicadores hídricos, sanitarios y eléctricos y, a partir de estos, la construcción de Índices de Riesgo georreferenciados por manzana, que permitirían elaborar un diagnóstico de la problemática, identificar los sectores más críticos y establecer prioridades de intervención.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Encuesta de servicios públicos

La encuesta diseñada para llevar a cabo el relevamiento de servicios públicos adoptaba como unidad de relevamiento la vivienda (Koutsovitis y Goyeneche, 2015). La información demográfica utilizada fue el Censo 2012 realizado por el Instituto de Vivienda de la Ciudad (IVC) en el barrio. El alcance del relevamiento fue definido en aproximadamente el 10% (+2%) de las viviendas de este Censo, para los sectores Villa 21-24, Loma Alegre y Alegre Pavimento del barrio, como se indica en la figura 1 y tabla 1.

Para que los indicadores y los índices de riesgo por manzana fueran comparables se definió que en ninguna manzana el porcentaje de viviendas relevadas respecto a las viviendas consignadas en el Censo 2012 superara el 15% ni fuera inferior al 8%.

La herramienta de relevamiento fue discutida y consensuada con la comunidad del barrio. El relevamiento de las viviendas fue llevado a cabo

por promotores comunitarios del barrio integrantes de la Junta Vecinal, voluntarios de TEMAS y docentes y estudiantes de la Cátedra de Ingeniería Comunitaria. La carga del relevamiento fue presencial y manual y luego se llevó a cabo la carga de las encuestas en una planilla de cálculo Excel especialmente diseñada.

Figura 1. Encuesta de servicios públicos

## 2.2 Determinación de presión en la red de agua interna

La presión en la red es un indicador de la seguridad del agua de consumo. Valores de presión inferiores a 1 bar (10 mca), u oscilaciones importantes en la presión, pueden poner en riesgo la calidad del agua, permitiendo que ingresen, a través de las fisuras o roturas de las mangueras o de las juntas de las tuberías, sustancias contaminantes, agua de las napas freáticas o restos de efluentes cloacales producto

de los desbordes continuos de instalaciones precarias (MIOPV, 2018).

Por lo tanto, el relevamiento mediante encuestas se complementó con determinaciones de presión de agua en las redes internas del barrio. Se realizaron 110 determinaciones de presión utilizando manómetros y adaptadores para conectarlos a las canillas domiciliarias que estuvieran conectadas directamente a la red pública.

Tabla 1. Datos poblacionales del barrio Villa 21-24 y alcance del relevamiento por sector y manzana

VILLA 21-24 SECTOR	Familias	Viviendas	Encuestas	Porcentaje
	Censo 2012 (IVC)		Relevamiento 2019	
<b>Sector 21-24</b>				
Manzana 1	556	313	31	9,9%
Manzana 2	129	129	13	10,1%
Manzana 3	108	65	7	10,8%
Manzana 4	95	69	8	11,6%
Manzana 5	232	146	21	14,4%
Manzana 6	178	120	15	12,5%
Manzana 7	666	387	40	10,3%
Manzana 8	988	481	49	10,2%
Manzana 9	185	119	12	10,1%
Manzana 10	184	150	<i>No relevadas</i>	
Manzana 11	329	194		
Manzana 12	220	166		
Manzana 13	262	177	19	10,7%
Manzana 14	279	165	18	10,9%
Manzana 15	156	120	14	11,7%
Manzana 16	141	97	10	10,3%
Manzana 17	96	65	6	9,2%
Manzana 18	408	295	31	10,5%
Manzana 19	212	161	<i>No relevada</i>	
Manzana 20	112	85	9	10,6%
Manzana 21	444	288	24	8,3%
Manzana 22	288	169	17	10,1%
Manzana 23	252	185	16	8,6%
Manzana 24	172	126	16	12,7%
Manzana 25	451	293	31	10,6%
Manzana 26	338	180	18	10,0%
Manzana 27	216	164	21	12,8%
Manzana 28	291	197	25	12,7%
Manzana 29	236	155	21	13,5%
<b>Total</b>	<b>9.407</b>	<b>5.261</b>	<b>464</b>	<b>9,4%</b>
<b>Loma Alegre</b>				
Manzana 1	456	244	29	11,9%
Manzana 2	80	46	5	10,9%
Manzana 3	127	67	9	13,4%
Manzana 4	147	89	8	9,0%
Manzana 5	110	58	6	10,3%
Manzana 6	72	46	5	10,9%
Manzana 7	94	45	5	11,1%
Manzana 8	164	104	10	9,6%
Manzana 9	113	64	10	15,6%
Manzana 10	226	155	20	12,9%
<b>Total</b>	<b>1.589</b>	<b>918</b>	<b>107</b>	<b>11,7%</b>
<b>Alegre Pavimentos</b>				
Manzana 1	126	83	9	10,8%
Manzana 2	67	35	4	11,4%
Manzana 3	81	37	4	10,8%
Manzana 4	116	87	9	10,3%
Manzana 5	109	67	7	10,4%
Manzana 6	159	102	11	10,8%
Manzana 7	161	109	11	10,1%
Manzana 8	95	68	7	10,3%
Manzana 9	27	13	4	30,8%
<b>Total</b>	<b>941</b>	<b>601</b>	<b>66</b>	<b>11,0%</b>

### 2.3 Indicadores e Índices de Riesgo

A partir de las encuestas se elaboraron un conjunto de indicadores de la calidad de los servicios públicos hídrico-sanitarios (agua y saneamiento cloacal) y eléctricos (tendido eléctrico) por manzana y, a partir de la ponderación de estos indicadores, se elaboraron los índices de riesgo hídrico-sanitario por manzana (figuras 2 y 3).

#### 2.4 Indicadores Hídricos-Sanitarios

- Viviendas que refieren no tener presión suficiente y continua de agua
- Viviendas que utilizan bomba de agua conectada de manera directa a la red
- Viviendas que reciben agua con características organolépticas modificadas
- Viviendas con desbordes de líquido cloacal frecuente
- Viviendas ubicadas en sector que se inunda

#### 2.5 Índice de Riesgo Hídrico-Sanitario

- Ponderación 3.0 para el indicador Viviendas que refieren no tener presión suficiente y continua de agua
- Ponderación 1.5 para el indicador Viviendas que utilizan bomba de agua conectada de manera directa a la red
- Ponderación 2.5 para el indicador Viviendas que reciben agua con características organolépticas modificadas
- Ponderación 2.0 para el indicador Viviendas con desbordes de líquido cloacal frecuente
- Ponderación 1.0 para el indicador Viviendas ubicadas en sector que se inunda

#### 2.6 Indicadores de Servicio Eléctrico

- Viviendas que refieren no tener tablero eléctrico
- Viviendas que refieren tener cables sueltos
- Viviendas que refieren cortes frecuentes de electricidad
- Viviendas que refieren filtraciones

#### 2.7 Índice de Riesgo Eléctrico

- Ponderación 2.5 para el indicador Viviendas que refieren no tener tablero eléctrico

- Ponderación 3.0 para el indicador Viviendas que refieren tener cables sueltos
- Ponderación 1.5 para el indicador Viviendas que refieren cortes frecuentes de electricidad
- Ponderación 3.0 para el indicador Viviendas que refieren filtraciones

Se estableció un criterio de validación para las encuestas, descartando aquellas que no tuvieran consignado ningún dato que permitiera identificar la vivienda o no tuvieran información de alguno de los indicadores utilizados para la construcción de los índices de riesgo. Se realizó un control de calidad de la carga de las encuestas, que consistió en determinar el error generado durante la carga de las encuestas revisando la información cargada eligiendo al azar un 20 % de encuestas por cada manzana. El error de la carga de encuestas estimado a partir de este criterio resultó inferior al 5% (tablas 2 a 7).

## RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los indicadores e índices de riesgo hídrico-sanitarios por sector y manzana, y el mapa de riesgo hídrico-sanitario del barrio, con una escala de colores según se indica en la referencia de la figura. A continuación, se presentan los resultados de los indicadores e índices de riesgo eléctrico por manzana y el mapa de riesgo eléctrico del barrio, con una escala de colores según se indica en la referencia de la figura.

En la figura 4, se presentan imágenes de las mediciones de presión realizadas en las canillas conectadas directamente a los conductos de la red pública del barrio y luego el resumen de los resultados de las 110 determinaciones de presión del agua, agregados por manzanas.

El artículo 9.C del marco regulatorio de la prestadora AySA (ERAS, 2007) se establece que la presión debe tender a 1 bar para garantizar la seguridad del agua, sin embargo, sólo 1 de las 110 mediciones arrojó un valor cercano, como se observa en la tabla 8 y la figura 5, y el promedio de los valores de presión medidos ( $2.08\text{mca} = 0.21\text{bar}$ ) es aproximadamente 5 veces menor.

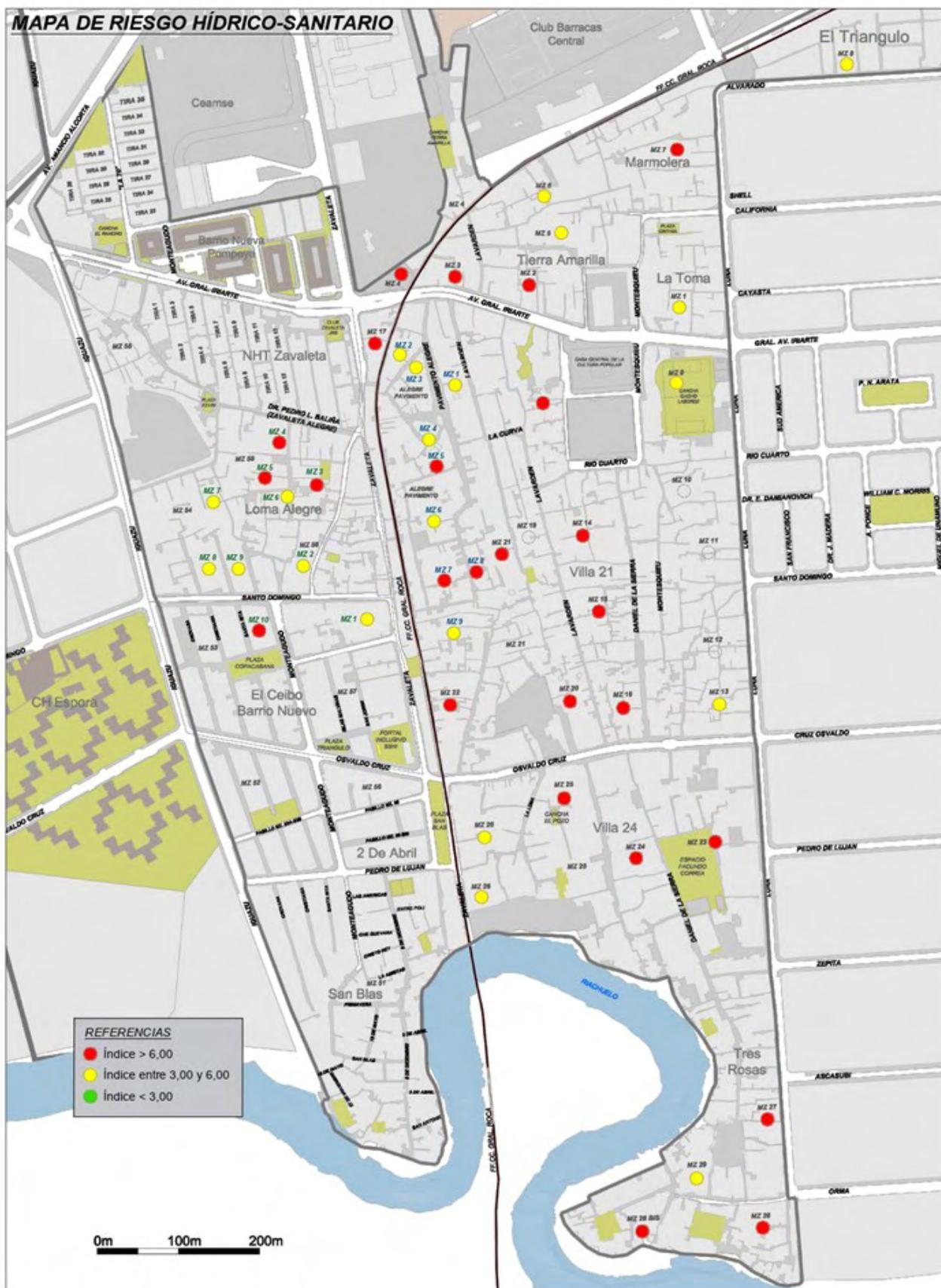


Figura 2. Mapa de riesgo Hídrico-sanitario del barrio



Figura 3. Mapa de riesgo Eléctrico del barrio

Tabla 2. Cálculo de indicadores e índice de riesgo hídrico-sanitario para Sector 21-24

Sector / Manzana	Cant. Viviendas relevantes	Cant. Hab. Abarcados	Hab./Viv	Asisten a comedores comunitarios	Viviendas que refieren no tener presión suficiente y continua de agua		Viviendas que utilizan bomba de agua conectada de manera directa a la red		Viviendas que reciben agua con características organolépticas modificadas		Viviendas con desbordes de líquido cloacal frecuente		Viviendas ubicadas en sector que se inunda		ÍNDICE DE RIESGO HÍDRICO-SANITARIO
					Pond. índice	3,0	Pond. índice	1,5	Pond. índice	2,5	Pond. índice	2,0	Pond. índice	1,0	
Manzana					Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	
<b>21-24</b>	<b>492</b>	<b>2245</b>	<b>4,56</b>	<b>21,4%</b>											
manzana 1	31	113	3,65	32,3%	0,65	1,94	0,45	0,68	0,37	0,91	0,84	1,68	0,48	0,48	5,69
manzana 2	13	62	4,77	15,4%	0,85	2,54	0,46	0,69	0,64	1,60	0,92	1,85	1,00	1,00	7,68
manzana 3	7	40	5,71	14,3%	1,00	3,00	0,71	1,07	0,52	1,31	0,86	1,71	0,71	0,71	7,81
manzana 4	8	29	3,63	12,5%	0,88	2,63	0,75	1,13	0,58	1,46	0,75	1,50	0,88	0,88	7,58
manzana 5	21	103	4,90	4,8%	0,76	2,29	0,14	0,21	0,37	0,91	0,76	1,52	0,71	0,71	5,65
manzana 6	15	62	4,13	40,0%	0,67	2,00	0,33	0,50	0,47	1,17	0,73	1,47	0,60	0,60	5,73
manzana 7	40	185	4,63	17,5%	0,85	2,55	0,48	0,71	0,49	1,23	0,88	1,75	0,80	0,80	7,04
manzana 8	49	186	3,80	6,1%	0,39	1,16	0,67	1,01	0,39	0,99	0,76	1,51	0,69	0,69	5,36
manzana 9	12	56	4,67	0,0%	0,42	1,25	0,42	0,63	0,33	0,83	0,50	1,00	0,50	0,50	4,21
manzana 10	0	0													
manzana 11	0	0													
manzana 12	0	0													
manzana 13	19	90	4,74	26,3%	0,68	2,05	0,32	0,47	0,42	1,05	0,74	1,47	0,79	0,79	5,84
manzana 14	18	75	4,17	11,1%	0,94	2,83	0,83	1,25	0,70	1,76	0,89	1,78	1,00	1,00	8,62
manzana 15	14	62	4,43	7,1%	0,86	2,57	0,57	0,86	0,38	0,95	0,71	1,43	0,79	0,79	6,60
manzana 16	10	66	6,60	50,0%	0,80	2,40	0,50	0,75	0,73	1,83	0,50	1,00	0,90	0,90	6,88
manzana 17	6	30	5,00	0,0%	0,83	2,50	0,83	1,25	0,28	0,69	1,00	2,00	1,00	1,00	7,44
manzana 18	31	152	4,90	12,9%	0,68	2,03	0,45	0,68	0,48	1,21	0,90	1,81	0,87	0,87	6,60
manzana 19	0	0													
manzana 20	9	35	3,89	11,1%	0,78	2,33	0,56	0,83	0,78	1,94	0,78	1,56	1,00	1,00	7,67
manzana 21	24	90	3,75	12,5%	0,79	2,38	0,63	0,94	0,49	1,22	0,83	1,67	0,58	0,58	6,78
manzana 22	17	74	4,35	17,6%	0,88	2,65	0,76	1,15	0,61	1,52	0,88	1,76	0,94	0,94	8,02
manzana 23	16	100	6,25	43,8%	0,75	2,25	0,63	0,94	0,52	1,30	0,75	1,50	0,56	0,56	6,55
manzana 24	16	77	4,81	18,8%	0,81	2,44	0,56	0,84	0,46	1,15	0,63	1,25	0,63	0,63	6,30
manzana 25	31	157	5,06	32,3%	0,84	2,52	0,55	0,82	0,69	1,72	0,68	1,35	0,48	0,48	6,90
manzana 26	18	84	4,67	22,2%	0,89	2,67	0,61	0,92	0,50	1,25	0,39	0,78	0,33	0,33	5,94
manzana 27	21	99	4,71	38,1%	0,81	2,43	0,24	0,36	0,51	1,27	0,76	1,52	0,48	0,48	6,06
manzana 28	25	135	5,40	60,0%	0,84	2,52	0,40	0,60	0,44	1,10	0,64	1,28	0,76	0,76	6,26
manzana 29	21	83	3,95	28,6%	0,71	2,14	0,48	0,71	0,44	1,11	0,48	0,95	0,48	0,48	5,40

Tabla 3. Cálculo de indicadores e índice de riesgo hídrico-sanitario para Sector Loma Alegre

Sector / Manzana	Cant. Viviendas relevantes	Cant. Hab. Abarcados	Hab./Viv	Asisten a comedores comunitarios	Viviendas que refieren no tener presión suficiente y continua de agua		Viviendas que utilizan bomba de agua conectada de manera directa a la red		Viviendas que reciben agua con características organolépticas modificadas		Viviendas con desbordes de líquido cloacal frecuente		Viviendas ubicadas en sector que se inunda		ÍNDICE DE RIESGO HÍDRICO-SANITARIO
					Pond. índice	3,0	Pond. índice	1,5	Pond. índice	2,5	Pond. índice	2,0	Pond. índice	1,0	
Manzana					Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	
<b>LOMA ALEGRE</b>	<b>107</b>	<b>524</b>	<b>4,90</b>	<b>25,4%</b>											
manzana 1	29	146	5,03	17,2%	0,48	1,45	0,62	0,93	0,41	1,03	0,66	1,31	0,52	0,52	5,24
manzana 2	5	28	5,60	40,0%	0,20	0,60	1,00	1,50	0,80	2,00	0,40	0,80	0,40	0,40	5,30
manzana 3	9	41	4,56	33,3%	0,67	2,00	0,89	1,33	0,59	1,48	0,78	1,56	0,89	0,89	7,26
manzana 4	8	47	5,88	25,0%	0,50	1,50	0,88	1,31	0,75	1,88	0,88	1,75	0,88	0,88	7,31
manzana 5	6	25	4,17	33,3%	0,50	1,50	0,83	1,25	0,50	1,25	0,83	1,67	0,67	0,67	6,33
manzana 6	5	30	6,00	20,0%	0,60	1,80	1,00	1,50	0,33	0,83	0,60	1,20	0,40	0,40	5,73
manzana 7	5	21	4,20	20,0%	0,60	1,80	0,60	0,90	0,60	1,50	0,60	1,20	0,40	0,40	5,80
manzana 8	10	45	4,50	40,0%	0,50	1,50	0,30	0,45	0,53	1,33	0,80	1,60	0,70	0,70	5,58
manzana 9	10	50	5,00	10,0%	0,60	1,80	0,50	0,75	0,43	1,08	0,40	0,80	0,10	0,10	4,53
manzana 10	20	91	4,55	15,0%	0,70	2,10	0,65	0,98	0,47	1,17	0,80	1,60	0,35	0,35	6,19

Tabla 4. Cálculo de indicadores e índice de riesgo hídrico-sanitario para Sector Pavimentos Alegre

Sector / Manzana	Cant. Viviendas relevantes	Cant. Hab. Abarcados	Hab./Viv	Asisten a comedores comunitarios	Viviendas que refieren no tener presión suficiente y continua de agua		Viviendas que utilizan bomba de agua conectada de manera directa a la red		Viviendas que reciben agua con características organolépticas modificadas		Viviendas con desbordes de líquido cloacal frecuente		Viviendas ubicadas en sector que se inunda		ÍNDICE DE RIESGO HÍDRICO-SANITARIO
					Pond. índice	3,0	Pond. índice	1,5	Pond. índice	2,5	Pond. índice	2,0	Pond. índice	1,0	
Manzana					Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	
<b>L.A. PAVIMENTOS</b>	<b>66</b>	<b>247</b>	<b>3,74</b>	<b>22,4%</b>											
manzana 1	9	28	3,11	0,0%	0,44	1,33	0,78	1,17	0,33	0,83	0,78	1,56	0,67	0,67	5,56
manzana 2	4	6	1,50	50,0%	0,00	0,00	1,00	1,50	0,00	0,00	0,50	1,00	0,50	0,50	3,00
manzana 3	4	15	3,75	25,0%	0,50	1,50	0,50	0,75	0,17	0,42	0,75	1,50	1,00	1,00	5,17
manzana 4	9	37	4,11	22,2%	0,44	1,33	0,67	1,00	0,48	1,20	0,67	1,33	0,67	0,67	5,54
manzana 5	7	26	3,71	14,3%	0,86	2,57	1,00	1,50	0,33	0,83	0,57	1,14	0,86	0,86	6,90
manzana 6	11	54	4,91	0,0%	0,00	0,00	1,00	1,50	0,45	1,14	0,64	1,27	0,64	0,64	4,55
manzana 7	11	38	3,45	36,4%	0,45	1,36	0,73	1,09	0,52	1,29	0,82	1,64	0,91	0,91	6,29
manzana 8	7	30	4,29	28,6%	0,57	1,71	1,00	1,50	0,19	0,48	0,86	1,71	0,86	0,86	6,26
manzana 9	4	13	3,25	25,0%	0,25	0,75	1,00	1,50	0,17	0,42	0,50	1,00	0,25	0,25	3,92

Tabla 5. Cálculo de indicadores e índice de riesgo eléctrico para Sector 21-24

Sector / Manzana	Cant. Viviendas relevadas	Cant. Hab. Abarcados	Hab./Viv	Viviendas que refieren no tener tablero eléctrico		Viviendas que refieren tener cables sueltos en la vivienda		Viviendas que refieren cortes frecuentes de electricidad		Viviendas con filtraciones		ÍNDICE DE RIESGO ELÉCTRICO
				Pond. índice	2,5	Pond. índice	3,0	Pond. índice	1,5	Pond. índice	3,0	
Manzana				Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	
<b>21-24</b>	<b>492</b>	<b>2245</b>	<b>4,56</b>									
manzana 1	31	113	3,65	0,29	0,73	0,26	0,77	0,81	1,21	0,26	0,77	3,48
manzana 2	13	62	4,77	0,46	1,15	0,85	2,54	0,92	1,38	0,77	2,31	7,38
manzana 3	7	40	5,71	0,43	1,07	0,71	2,14	0,86	1,29	0,71	2,14	6,64
manzana 4	8	29	3,63	0,38	0,94	0,50	1,50	1,00	1,50	0,25	0,75	4,69
manzana 5	21	103	4,90	0,38	0,95	0,57	1,71	0,76	1,14	0,43	1,29	5,10
manzana 6	15	62	4,13	0,33	0,83	0,60	1,80	0,87	1,30	0,53	1,60	5,53
manzana 7	40	185	4,63	0,35	0,88	0,38	1,13	0,90	1,35	0,33	0,98	4,33
manzana 8	49	186	3,80	0,24	0,61	0,45	1,35	0,69	1,04	0,86	2,57	5,57
manzana 9	12	56	4,67	0,50	1,25	0,42	1,25	0,83	1,25	0,17	0,50	4,25
manzana 10	0	0										
manzana 11	0	0										
manzana 12	0	0										
manzana 13	19	90	4,74	0,32	0,79	0,53	1,58	1,00	1,50	0,37	1,11	4,97
manzana 14	18	75	4,17	0,39	0,97	0,56	1,67	1,00	1,50	0,67	2,00	6,14
manzana 15	14	62	4,43	0,36	0,89	0,57	1,71	0,86	1,29	0,43	1,29	5,18
manzana 16	10	66	6,60	0,70	1,75	0,20	0,60	0,90	1,35	0,60	1,80	5,50
manzana 17	6	30	5,00	0,17	0,42	0,33	1,00	1,00	1,50	0,33	1,00	3,92
manzana 18	31	152	4,90	0,52	1,29	0,42	1,26	0,87	1,31	0,71	2,13	5,98
manzana 19	0	0										
manzana 20	9	35	3,89	0,22	0,56	0,44	1,33	0,89	1,33	0,67	2,00	5,22
manzana 21	24	90	3,75	0,71	1,77	0,58	1,75	0,63	0,94	0,50	1,50	5,96
manzana 22	17	74	4,35	0,76	1,91	0,41	1,24	0,94	1,41	0,35	1,06	5,62
manzana 23	16	100	6,25	0,25	0,63	0,38	1,13	0,69	1,03	0,63	1,88	4,66
manzana 24	16	77	4,81	0,13	0,31	0,50	1,50	0,75	1,13	0,56	1,69	4,63
manzana 25	31	157	5,06	0,71	1,77	0,65	1,94	0,71	1,06	0,74	2,23	7,00
manzana 26	18	84	4,67	0,39	0,97	0,39	1,17	0,89	1,33	0,28	0,83	4,31
manzana 27	21	99	4,71	0,43	1,07	0,48	1,43	0,52	0,79	0,52	1,57	4,86
manzana 28	25	135	5,40	0,60	1,50	0,44	1,32	0,72	1,08	0,52	1,56	5,46
manzana 29	21	83	3,95	0,43	1,07	0,62	1,86	0,81	1,21	0,57	1,71	5,86

Tabla 6. Cálculo de indicadores e índice de riesgo eléctrico para Sector Loma Alegre

Sector / Manzana	Cant. Viviendas relevadas	Cant. Hab. Abarcados	Hab./Viv	Viviendas que refieren no tener tablero eléctrico		Viviendas que refieren tener cables sueltos en la vivienda		Viviendas que refieren cortes frecuentes de electricidad		Viviendas con filtraciones		ÍNDICE DE RIESGO ELÉCTRICO
				Pond. índice	2,5	Pond. índice	3,0	Pond. índice	1,5	Pond. índice	3,0	
Manzana				Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	
<b>LOMA ALEGRE</b>	<b>107</b>	<b>524</b>	<b>4,90</b>									
manzana 1	29	146	5,03	0,48	1,21	0,52	1,55	0,93	1,40	0,59	1,76	5,91
manzana 2	5	28	5,60	0,00	0,00	0,40	1,20	1,00	1,50	0,40	1,20	3,90
manzana 3	9	41	4,56	0,44	1,11	0,67	2,00	1,00	1,50	0,33	1,00	5,61
manzana 4	8	47	5,88	0,38	0,94	0,63	1,88	1,00	1,50	0,63	1,88	6,19
manzana 5	6	25	4,17	0,67	1,67	0,83	2,50	0,83	1,25	0,33	1,00	6,42
manzana 6	5	30	6,00	0,60	1,50	0,40	1,20	0,60	0,90	0,80	2,40	6,00
manzana 7	5	21	4,20	0,60	1,50	0,80	2,40	1,00	1,50	0,80	2,40	7,80
manzana 8	10	45	4,50	0,30	0,75	0,50	1,50	0,70	1,05	0,20	0,60	3,90
manzana 9	10	50	5,00	0,20	0,50	0,10	0,30	0,90	1,35	0,50	1,50	3,65
manzana 10	20	91	4,55	0,35	0,88	0,50	1,50	0,95	1,43	0,40	1,20	5,00

Tabla 7. Cálculo de indicadores e índice de riesgo eléctrico para Sector Pavimentos Alegre

Sector / Manzana	Cant. Viviendas relevadas	Cant. Hab. Abarcados	Hab./Viv	Viviendas que refieren no tener tablero eléctrico		Viviendas que refieren tener cables sueltos en la vivienda		Viviendas que refieren cortes frecuentes de electricidad		Viviendas con filtraciones		ÍNDICE DE RIESGO ELÉCTRICO
				Pond. índice	2,5	Pond. índice	3,0	Pond. índice	1,5	Pond. índice	3,0	
Manzana				Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	Indicador	Índice	
<b>L.A. PAVIMENTOS</b>	<b>66</b>	<b>247</b>	<b>3,74</b>									
manzana 1	9	28	3,11	0,33	0,83	0,33	1,00	0,89	1,33	0,22	0,67	3,83
manzana 2	4	6	1,50	0,50	1,25	0,50	1,50	1,00	1,50	0,50	1,50	5,75
manzana 3	4	15	3,75	0,50	1,25	0,25	0,75	0,50	0,75	0,25	0,75	3,50
manzana 4	9	37	4,11	0,56	1,39	0,33	1,00	0,89	1,33	0,56	1,67	5,39
manzana 5	7	26	3,71	0,00	0,00	0,29	0,86	0,29	0,43	0,14	0,43	1,71
manzana 6	11	54	4,91	0,36	0,91	0,27	0,82	0,91	1,36	0,27	0,82	3,91
manzana 7	11	38	3,45	0,36	0,91	0,36	1,09	0,82	1,23	0,09	0,27	3,50
manzana 8	7	30	4,29	0,14	0,36	0,57	1,71	1,00	1,50	0,14	0,43	4,00
manzana 9	4	13	3,25	0,50	1,25	0,25	0,75	1,00	1,50	0,25	0,75	4,25



Figura 4. Imágenes de la medición de presión en canillas conectadas a las redes públicas de agua del barrio

Tabla 8. Resultados de la campaña de determinación de la presión en la red pública de agua del barrio

Sector	Manzana	Cantidad de mediciones realizadas	Cantidad de viviendas sin servicio al momento de la medición	Presión medida promedio (mca)	Presión medida máxima (mca)
21-24	1	3	1	0,47	0,90
	2	2	1	1,63	3,25
	3	2	2	0,00	0,00
	4	2	1	0,60	1,20
	5	2	0	2,53	2,85
	6	2	1	0,10	0,20
	7	2	0	4,30	5,40
	8	1	0	2,80	2,80
	9	2	1	1,70	3,40
	10	3	0	1,83	2,80
	11	2	1	0,65	1,30
	12	3	1	1,78	2,95
	13	2	0	1,98	2,15
	14	3	0	0,75	1,00
	15	2	2	0,00	0,00
	16	4	2	0,54	1,80
	17	2	0	8,90	9,00
	18	2	0	2,10	2,45
	19	3	1	0,73	1,30
	20	5	3	0,25	0,75
	21	2	2	0,00	0,00
	22	2	1	0,50	1,00
	23	2	0	3,00	3,20
	24	2	0	2,65	3,30
	25	3	0	1,37	1,80
	26	4	2	1,20	3,20
	27	2	0	2,30	3,20
	28	2	0	2,98	3,00
	29	2	0	3,15	3,30
25/26	1	0	3,00	3,00	
28 BIS	2	2	0,00	0,00	
Loma Alegre	LA MZ 1	2	0	1,95	2,20
	LA MZ 2	2	0	2,75	4,90
	LA MZ 3	2	1	0,50	1,00
	LA MZ 4	2	1	0,80	1,60
	LA MZ 5	1	1	0,00	0,00
	LA MZ 6	2	1	0,60	1,20
	LA MZ 7	2	0	3,70	4,20
	LA MZ 8	2	0	5,90	9,80
	LA MZ 9	2	0	6,35	6,70
	LA MZ 10	2	0	4,35	4,50
Pavimentos Alegre	PA MZ 1	3	0	2,83	4,80
	PA MZ 2	1	0	3,60	3,60
	PA MZ 3	2	0	2,60	3,00
	PA MZ 4	2	0	4,30	4,80
	PA MZ 5	2	0	3,30	3,60
	PA MZ 6	2	0	1,85	2,10
	PA MZ 7	2	0	1,45	1,70
	PA MZ 8	2	0	0,83	0,95
	PA MZ 9	2	0	2,70	3,00
<b>Total</b>	<b>29</b>	<b>110</b>	<b>Promedio</b>	<b>2,08</b>	<b>2,68</b>

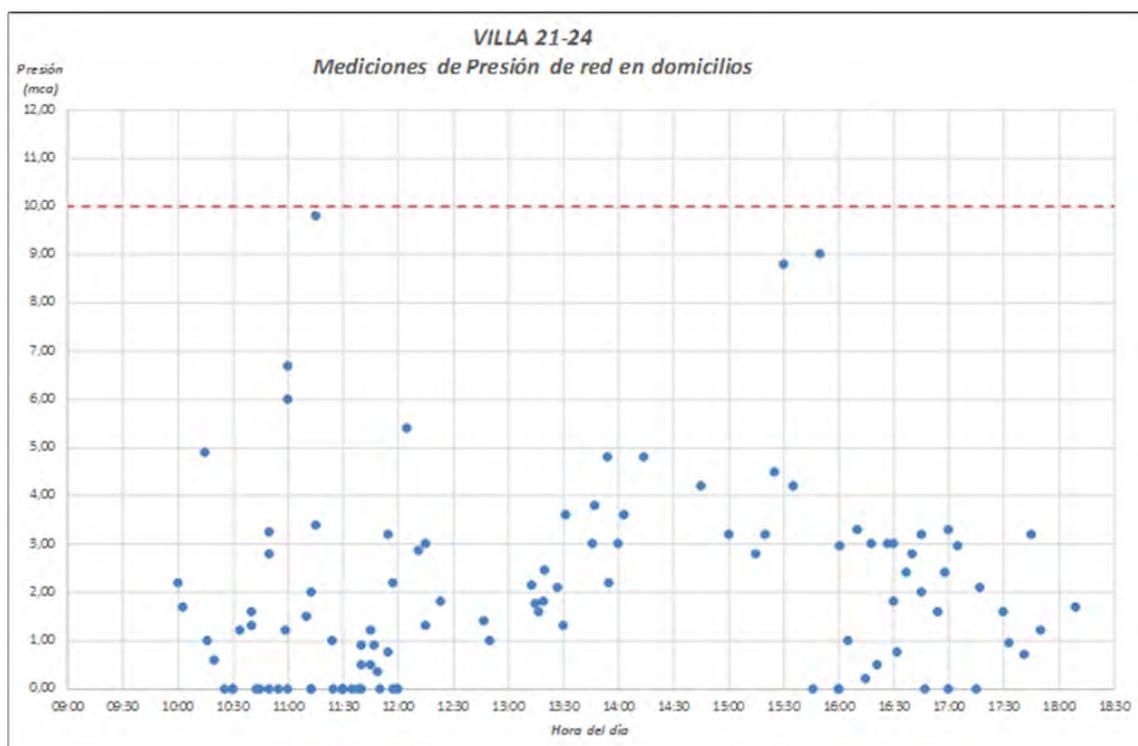


Figura 5. Resultados de las mediciones de presión efectuadas (se indica el valor de 1 bar = 10mca)

## CONCLUSIONES

Los resultados de los índices de riesgo hídrico-sanitarios evidencian un Nivel de Riesgo Alto en el 70% de las manzanas de la Villa 21-24. Para el sector de Loma Alegre, el 40% de las manzanas presentan Nivel de Riesgo Alto y para Alegre Pavimento el porcentaje de manzanas con Nivel de Riesgo Alto es del 33%. Ninguna manzana presenta Nivel de Riesgo Bajo-Moderado. El promedio de las mediciones de presión en la red pública de agua para la Villa 21-24 es de 0.17 bares, 0.28 para Loma Alegre y 0.26 para Alegre Pavimento; correlacionándose los menores valores de presión con los mayores niveles de riesgo. Los resultados de los índices de riesgo eléctrico evidencian Nivel de Riesgo Alto en el 16% de las manzanas de la Villa 21-24 y un Nivel de Riesgo Moderado-Alto en el 84%. Para el sector de Loma Alegre el 30% de las manzanas presentan Nivel de Riesgo Alto y un Nivel de Riesgo Moderado-Alto en el 70%. Para Alegre Pavimento el porcentaje de manzanas con Nivel de Riesgo Moderado-Alto es del 90% y una sola manzana presenta Nivel de Riesgo Bajo-Moderado.

## CONSIDERACIONES Y PROPUESTAS

A continuación, se sintetizan un conjunto de propuestas de corto y mediano plazo para reducir y mitigar los riesgos hídrico-sanitario y eléctrico en el barrio.

- Los organismos competentes deberán diseñar en conjunto con la Junta Vecinal un Programa de Mantenimiento para la infraestructura de servicios públicos y un Plan de Contingencia frente a desbordes cloacales, falta de suministro del agua de consumo, inundaciones, cortes de luz e incendio.
- Las viviendas que no cuenten con sistemas confiables de almacenamiento para el agua de consumo deberán ser abastecidas gratuitamente de tanques plásticos de calidad homologada.
- Los organismos competentes deberán Incorporar un Programa de Limpieza periódica de tanques que pueda llevarse adelante por cooperativas incorporando mano de obra del barrio.
- Los organismos competentes deberán llevar a cabo un relevamiento físico exhaustivo de la

- infraestructura sanitaria de agua potable y cloacal en todas manzanas que presenten valores de Índice Hídrico-Sanitario ALTO.
- e. Hasta tanto los organismos competentes elaboren un diagnóstico preciso de la problemática sanitaria e identifiquen con precisión las causas de la contaminación bacteriológica, se recomienda adoptar las siguientes medidas:
- Deberá garantizarse a todas las familias de la zona afectada (manzanas con Índice de Riesgo Hídrico-Sanitario ALTO) agua potable segura mediante el llenado de los tanques domiciliarios y la entrega adicional de sachets de agua. Especialmente deberá garantizarse a todos los comedores comunitarios de la zona la entrega de agua potable segura.
  - Deberá implementarse un protocolo de actuación para informar respecto a la problemática sanitaria detectada y brindar pautas claras de manejo y alerta respecto al agua de consumo a todas las familias localizadas en la zona afectada.
  - Realizar relevamientos/controles de salud periódicos a las familias localizadas en los sectores críticos del barrio.
- f. Diseñar e implementar, hasta tanto el servicio sanitario sea regularizado y operado por la prestadora AySA, un sistema de monitoreo de la calidad, presión y continuidad del servicio de agua corriente en toda la Villa 21-24. Se recomienda, con una frecuencia bimestral, analizar mediante la aplicación de protocolos de calidad físico-químicos y bacteriológicos 6 puntos de muestreo por Manzana acordados con la Junta Vecinal.
- g. Regularizar y formalizar el servicio de agua potable y saneamiento cloacal a todas las viviendas frentistas alcanzadas por los criterios establecidos en la Resolución N°26 del APLA (APLA, 2017). El servicio de agua potable y saneamiento cloacal deberá ser gratuito durante un período no menor a los 10 años para compensar la vulneración sistemática del derecho al agua potable a la que se encuentran expuestos los habitantes del barrio.
- h. Todas las obras de infraestructura que se ejecuten en el barrio deberán tener el carácter de definitivas, concluir con la conexión a las viviendas formalizando el acceso al servicio y llevarse a cabo en el marco de un Convenio entre el organismo competente de la Ciudad y la empresa prestadora. El Convenio deberá consensuarse con la Junta Vecinal y las obras deberán contar con mecanismos de control ciudadano, por ejemplo, incorporando la figura de los Veedores Comunitarios de Obras de Infraestructura.
- i. La empresa prestadora AySA deberá garantizar en las redes que abastecen al barrio presiones adecuadas, para que la presión en las redes internas alcance valores compatibles con un suministro seguro (ENOHSA, 2001; ERAS, 2007).
- j. Los organismos de gobierno competentes llevarán adelante un Programa de Prevención articulado con la Junta Vecinal que provea de luces de emergencia y matafuegos a las viviendas de las manzanas que presenten Índice de Riesgo Eléctrico ALTO.
- k. Los organismos de gobierno competentes llevarán a cabo un Plan General de Obras que permita reacondicionar y garantizar instalaciones internas seguras, con elementos de protección y canalizaciones de conductores respetando los criterios técnicos y normativos establecidos en la “Guía de Diseño de Redes Eléctricas de Baja Tensión para Asentamientos Poblacionales de la Categoría ‘A’”, elaborado por el Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) y la Asociación Electrotécnica Argentina (ENRE, 2007).
- l. El Gobierno de la Ciudad diseñará un Programa de Asistencia continua para subsanar los daños que sufran las viviendas y los bienes de las familias durante cortes de luz u oscilaciones de tensión (daño a artefactos eléctricos, etc.), inundaciones e incendios.

## REFERENCIAS

- APLA, Agencia de Planificación (2017). Resolución N°26: *Criterios de Intervención en Construcción de Infraestructura y Operación del Servicio de Agua y Saneamiento en Barrios Populares/Urbanizaciones Emergentes*. Buenos Aires, Argentina. [http://apla.gov.ar/vxct22007.avnam.net/files/pdf/2017/10/Resolucion\\_N\\_26\\_17.pdf](http://apla.gov.ar/vxct22007.avnam.net/files/pdf/2017/10/Resolucion_N_26_17.pdf)
- ENOHSA, Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento (2001). *Guías para la Presentación de Proyectos de Agua Potable*. Buenos Aires, Argentina.
- ENRE, Ente Nacional Regulador de Electricidad (2007). *Guía de Diseño de Redes Eléctricas de Baja Tensión para Asentamientos Poblacionales de la Categoría 'A'—AEA 90707*. Ente Nacional Regulador de Electricidad, Buenos Aires, Argentina. 34p.
- Ente Regulador de Agua y Saneamiento (ERAS). 2007. Marco Regulatorio para la prestación del servicio público de agua potable y desagües cloacales. Buenos Aires, Argentina. [http://www.vocesenelfenix.com/sites/default/files/numero\\_pdf/fenix47%20baja.pdf](http://www.vocesenelfenix.com/sites/default/files/numero_pdf/fenix47%20baja.pdf).
- Koutsovitis, M., Baldiviezo, J. (2015). Los Servicios Públicos de Saneamiento Básico en los Barrios Informales. *Revista del Plan Fénix* 47: 136-143.
- Koutsovitis, M., Goyeneche, M. (2015). *Mapa epidemiológico comunitario de los Barrios de la Ribera de la Cuenca Matanza-Riachuelo*. VIII Congreso de Meio Ambiente da AUGM. Porto Alegre, Brasil.
- MIOPV, Ministerio del Interior, Obra Pública y Vivienda. (2018). *Versión taquigráfica de Audiencia Pública Propuesta de Adecuación Tarifaria AySA, Villa Martelli, Argentina*. 15/11/2018. <http://www.eras.gov.ar/download/audiencia/Version-Taquigrafica-Audiencia-Publica-dia-15-11-18.pdf>

*Como citar este artículo:*

Koutsovitis, M., Goyeneche, M. (2019). Propuesta metodológica y elaboración de índices de riesgo de servicios públicos en un barrio popular de la ciudad de Buenos Aires. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 97-110. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-09



## Evaluación del deterioro de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial

*Evaluation of the degradation of sanitary and storm drainage systems*

Manuel M. Cabrera Delgadillo<sup>1\*</sup>, Guadalupe Sánchez Campos<sup>1</sup>,  
Juan Carlos Mejía Suárez<sup>1</sup>, Carmen Hernández Pastor<sup>1</sup>

Recibido: 19/08/2019

Aceptado: 25/09/2019

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Se presenta una propuesta para el proceso de evaluación del deterioro de tuberías de drenaje, que se inscribe en la etapa de diagnóstico, dentro de un programa de acciones de mantenimiento, que se divide en las etapas: 1) Inspección, 2) Limpieza, 3) Diagnóstico y 4) Renovación, con objeto de retardar o corregir anomalías físicas y operacionales en los sistemas de drenaje sanitario y pluvial. Se describen anomalías, así como su recomendado orden de atención, teniendo como: Inmediato, destrucción de tubería; Alto, permiten infiltración y exfiltración del flujo, como dislocamientos o desacoplamientos; Medio, daños por deterioro de pared y obstrucciones, sin infiltración y exfiltración del flujo y Bajo, sin anomalías con flujo a superficie libre; que se agravan por bajo o nulo mantenimiento, potenciado por el paso del tiempo. El Diagnóstico, incluye I. Labores de inspección, incluye A. Estudios básicos del interior de conductos con técnicas de video inspección, B. Levantamiento Topográfico y C. Estudio de Aforos; II. Valoración de Estado General Actual, con valuación de 1. Estado Físico, 2. Estado Operacional y 3. Edad del colector; III. Estudios Complemento, considerando 4. Desarrollo Urbano, 5. Hundimiento diferencial del suelo y 6. Encharcamientos; IV. Valoraciones de Apoyo, para la selección de materiales para colectores, contemplando zonificación 7. Sísmica y 8. Geotécnica. La conservación de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial, es de interés o utilidad pública, por su naturaleza física y costo, debe ser entendida como elemento para el desarrollo social, pues contribuye en la salud y desarrollo de sus habitantes.

**Palabras clave:** Drenaje, diagnóstico, inspección, anomalías, valoración, riesgos, tuberías, renovación

### Abstract

*A proposal is presented for the process of evaluating the deterioration of drainage pipes, which is included in the diagnostic stage, within a program of maintenance actions, which is divided into the following stages: 1) Inspection, 2) Cleaning, 3) Diagnosis and 4) Renewal, with the aim of postponing or correcting physical and operational anomalies in the sanitary and rain drainage systems. Anomalies are described, as well as their recommended order of attention, having as Immediate, destruction of the pipe; High, allowing infiltration and exfiltration of the flow, such as dislocations or disconnections; Medium, damage due to wall deterioration and obstructions, without infiltration and exfiltration of the flow and Low, without anomalies with the flow to the free surface; which are aggravated by low or no maintenance, reinforced by the passage of time. Diagnosis includes I. Inspection tasks, includes A. Basic studies of the interior of ducts with video inspection techniques, B. Topographic Survey and C. Study of the capacity of the ducts; II. Current General State Assessment, with an evaluation of 1. Physical State, 2. Complementary Studies, considering 4. Urban Development, 5. Landfills; IV. Support Valuations, for the selection of materials for collectors, contemplating the zonification 7. Seismic and 8. The conservation of sanitary and pluvial drainage systems is of public interest or utility, due to its physical nature and cost, it must be understood as an element for social development, since it contributes to the health and development of its residents.*

**Keywords:** Drainage, diagnostic, inspection, anomalies, assessment, risks, piping, renovation.

1 WT Diseño Sustentable S.C. mcabrera@wtds.mx; gsanchez@wtds.mx; jcmejia@wtds.mx; chernandez@wtds.mx

## INTRODUCCIÓN

En México, la mayoría de las grandes urbes presentan un importante deterioro por erosión en las tuberías y estructuras de drenaje, debido a un medio atmosférico de gas o vapores de ácido sulfúrico, que se interpreta como vejez del material, derivado también por la edad de los conductos, la falta de supervisión y mantenimiento; lo que provoca insuficiencia del servicio, con la consecuente presencia de encharcamientos o formación de socavones, con efecto negativo a los bienes particulares y públicos.

Derivado de la supervisión del estado operacional de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial, se programan acciones de mantenimiento, que básicamente se divide en cuatro etapas: 1) inspección, 2) limpieza, 3) diagnóstico y 4) renovación, realizadas de forma periódica con objeto de retardar o corregir el deterioro del sistema.

El presente trabajo se centra en el diagnóstico del estado del sistema de alcantarillado, para dar paso a técnicas que procuren la renovación del servicio que prestan los drenajes a la sociedad, a través de tres principales opciones de intervención, siendo reparación, rehabilitación y sustitución.

Se describe un procedimiento de evaluación del estado funcional y estructural de tuberías, que identifica la razón y grado del deterioro de tuberías, ante la detección de problemas de funcionamiento hidráulico, mediante la valuación del medio físico que rodea el sistema de drenaje. Permite la generación de información relevante para la planeación de un proyecto de renovación, al proporcionar requerimientos, objetivos, alternativas de solución y beneficios, como elementos de valuación, para un anteproyecto de ingeniería básica, que permiten ser la base de la siguiente etapa de proyecto ejecutivo y construcción de la alternativa seleccionada.

Para describir el procedimiento de evaluación del estado funcional y estructural de tuberías, se contemplan las particularidades del sistema de drenaje de la Ciudad de México, con el reto de

mantener y ampliar una infraestructura robusta de drenaje, que data de finales del siglo XIX, presionada en su capacidad hidráulica, por el dinámico crecimiento demográfico, población flotante, torrentes considerables de lluvia, importante desarrollo longitudinal y afectada por fenómenos geotécnicos, principalmente el hundimiento diferencial del suelo blando y sismos.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción de la zona de estudio

En el Valle de México existe un sistema de drenaje conformado por tuberías de gran diámetro, que permiten una amplia flexibilidad en la operación del sistema de drenaje. Esta flexibilidad se debe, entre otras razones, a la antigüedad del sistema y la incertidumbre de los parámetros que definen el caudal (densidad poblacional y torrentes en tiempos de lluvia). Esto implica tomar en cuenta para la operación del sistema, un gasto básico sanitario para un manejo dedicado en temporada de secas, al tránsito de aguas servidas (meses de noviembre a abril) y un gasto máximo extraordinario combinado en la temporada de lluvias (mayo a octubre).

En orden de diámetros e importancia operativa, destaca el drenaje profundo, apoyada por una red primaria de colectores, que desalojan la red secundaria conformada por atarjeas, que lo mismo desalojan aguas pluviales como servidas, no obstante, actualmente los estándares de diseño y normatividad aplicables al drenaje, exigen en México un sistema separado entre las aguas sanitarias y pluviales, para garantizar la operación adecuada de ambas redes y de las plantas de tratamiento. A excepción del drenaje profundo, las entidades responsables de la construcción, operación y mantenimiento, han documentado y atienden, una alta tasa de pérdida de la integridad estructural de tuberías, además de la reducción de la capacidad de conducción hidráulica en una importante fracción del sistema de colectores y atarjeas, por lo que se trabaja en un ambicioso e importante plan para rehabilitar tramos de tubería afectados.

## 2.2 Operación

La operación del sistema de drenaje, se ve afectada por la intensidad de las labores de mantenimiento, que de manera básica se trata del retiro de obstrucciones, causadas por defectos estructurales o por una acumulación de material. El material acumulado puede incluir aceites, grasas, sedimentos u otros materiales. Ciertos defectos estructurales provocan una mayor acumulación de sólidos que eventualmente bloquean la tubería. La intrusión de raíces, a través de defectos estructurales, es un contribuyente importante de bloqueos.

De acuerdo con la *American Society of Civil Engineers* y el folleto documento EPA 832-F-99-031 (EPA, 1999), el mantenimiento de tuberías debe estar considerado en un programa anual diversificado en porcentaje de actividades al año, que preponderantemente abarcan: *limpieza 29,90%; eliminación de raíces 2,90%; inspección de pozos de visita 19,80%; video inspección 6,80%, otras pruebas de apoyo (acústica, GPR, etc.) 7,80%*. El mismo documento destaca que *el 80% de los problemas ocurren en el 25% del sistema* (Hardin y Mecer, 1997).

El bajo o nulo mantenimiento incrementa las obstrucciones agravándose en el tiempo, hasta el punto de llegar a la Sustitución de tuberías, que representan costos mayores con respecto a la prevención.

También, en el folleto informativo de la EPA (EPA, 1991) se establecen variables que determinan la prioridad en el programa de mantenimiento [sic]:

- 1) *Edad: los sistemas más antiguos tienen un mayor riesgo de deterioro que los recién construidos.*
- 2) *Material de construcción: tuberías construidas con materiales más susceptibles a corrosión tienen un mayor potencial de deterioro y colapso. Tuberías no reforzadas de concreto, ladrillo y asbesto-cemento son ejemplos de tuberías susceptibles a corrosión.*
- 3) *Diámetro de tubería o capacidad de conducción: tuberías que reciben mayores gastos de aportación tienen prioridad sobre las que transportan gastos reducidos.*

4) *Ubicación: tuberías ubicadas en áreas con poca inclinación o que tienen una alta probabilidad de inundación tienen una mayor prioridad.*

5) *Tuberías a presión vs. tuberías de flujo por gravedad: tuberías con funcionamiento a presión tienen una mayor prioridad por encima de las de tienen un funcionamiento a superficie libre, considerando una equivalencia en diámetro, dada la complejidad de su limpieza y rehabilitación.*

6) *Condiciones subterráneas: la profundidad del nivel freático, la profundidad hasta el estrato rocoso, las características del suelo (clasificación, resistencia, porosidad, compresibilidad, susceptibilidad a heladas, erodabilidad y pH).*

7) *Potencial de corrosión: el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es responsable por la corrosión de las tuberías, las estructuras y los equipos usados en sistemas de alcantarillado. Es necesario hacer un monitoreo de las condiciones en el interior de las tuberías e implementar tratamientos según sea necesario para prevenir el crecimiento de película bacteriana y la producción de gases de  $H_2S$ .*

Bajo las prioridades anteriores y detectadas irregularidades en la operación del drenaje, se verifica una inspección, como parte de la primera etapa de la evaluación del deterioro de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial.

## 2.3. Diagnóstico

Por la extensión de los sistemas, ausencia de programas de mantenimiento y otras razones, la identificación de colectores y tramos problemáticos, son en su mayoría bajo acciones correctivas, derivadas de reportes de encharcamientos, desbordamientos, detección tardía de socavones y desatenciones de anomalías, que no se identifican de forma temprana.

Una acción preventiva es el mapeo de la red de drenaje y relacionarlo con las advertencias que proporcionan los mapas de riesgo y entorno urbano. Sobre mapas o planos de infraestructura urbana son recomendables desarrollar las siguientes valuaciones o Valoraciones: a) estado

general, b) desarrollo urbano, según la información disponible c) hundimiento diferencial del suelo, d) encharcamientos, e) zonificación geotécnica y f) zonificación sísmica.

Cada una de las anteriores valuaciones o valoraciones, como se dispone llamarles en esta metodología, se propone desarrollar sobre la base de un plano general usado como índice o generar fichas particulares funcionales del colector o atarjea, que debe incluir la traza, información de desarrollo geométrico e hidráulico, indicando por tramos, diámetro, sentido del flujo, longitud del colector, pendiente, cuenca hidrológica urbana, material (rugosidad), con base en el proyecto original o información de catastro; así como, los datos básicos de proyecto, siendo la población beneficiada, gasto sanitario y el gasto pluvial con el cual se evalúa el funcionamiento hidráulico tanto en condiciones actuales como a condiciones de diseño.

Este ejercicio de mapeo, resulta valioso para la detección indirecta de problemas operacionales, apreciación de la calidad de las aguas conducidas; así como planificar labores de inspección, acciones de mantenimiento de conservación o correctivo, considerando la priorización recomendada en el folleto informativo de la EPA.

### 2.3.1 Labores de Inspección

- a. Acompañando el mantenimiento, que debe incluir la limpieza del colector, conviene en paralelo realizar labores de inspección que incluyan técnicas de inspección física, levantamientos topográficos y el monitoreo de los gastos, en la longitud total del colector o tramos particulares con el fin de diagnosticar el estado, grado de daño y medidas de remediación, describiéndose a continuación.
- b. Estudio de video inspección y sensores múltiples. La técnica de video inspección, implica la aplicación de la visión al interior de la tubería, mediante una videocámara instalada sobre un robot móvil a control remoto habilitado por llantas, cable de energía, cadena de rescate e izaje, circulando al interior de la tubería con apoyo geoespacial

controlado por computadora, lo que permite conocer la ubicación exacta de la anomalía detectada en tuberías mayores a 450 mm. Según el modelo y marca del equipo, se posee una visión de 360 grados en lo horizontal y 90 grados en vertical, apoyada por iluminación artificial, está limitada por la calidad de imagen que depende de la tecnología de los lentes disponible por fabricante, por lo que la técnica se ha restringido a las evaluaciones de juntas de tuberías, rupturas, fugas, salientes, intrusiones de raíz y obstrucciones.

- c. Los sensores múltiples son un método de apoyo al video inspección, funciona a partir de emisión de señales que permiten medir geometría, corrosión y la condición de las juntas. Existen en el mercado novedosas tecnologías que trabajan en conjunto con el video inspección, como el escaneo por láser, que permite una reconstrucción 3-D del interior de la tubería. Son equipos costosos y se requiere de una capacitación especializada.
- d. Estudio de levantamiento topográfico. Consiste en la lectura de niveles de base y clave de tubería, con referencia superficial o del terreno, medido al interior de los pozos de visita, para determinar la pendiente y niveles, entre pozos de visita, generalmente con un teodolito o estación total. Con los datos obtenidos en el levantamiento topográfico, se realiza la comparación de niveles contra proyecto, para la identificación histórica de desviaciones de niveles, por lo que la técnica está limitada a conocer el detalle de geométrico de los puntos extremos de los tramos entre pozos de vista, sin el detalle del estado intermedio, por lo que es complemento de la video inspección.
- e. Estudio de Aforos. Son recomendables para la medición del caudal de funcionamiento, para fines de verificación de capacidad de conducción y calidad de operación de colectores y atarjeas, siendo recomendables los métodos ASTM D5130-2014, para la medición de caudal en canal abierto indirectamente por el método de pendiente-área; ASTM-D5242-2013, para la medición de caudal con vertederos de placas delgadas y ASTM-D5243-2013 medición de flujo indirectamente en alcantarillas.

### 2.3.2 Valoración de Estado General Actual

#### Estado Físico

- En el siguiente paso de las labores de inspección, se evalúan las anomalías identificadas, entendiendo éstas como la desviación respecto del estado normal o previsible del interior de los conductos de drenaje. Es una práctica de comparación visual de las fotografías o videos levantados en campo, contra un catálogo que agrupa pictogramas que representan el tipo de anomalía, clasificada en cuatro categorías de atención, junto con un código de colores, el tramo de colector calificado como inmediato en rojo, alto en naranja, medio en amarillo y bajo en verde, en analogía a un semáforo vial.
- Inmediato, agrupa anomalías identificadas como destrucción de tubería, flujo a tubo lleno o en contrapendiente, siendo: Tubería colapsada con fisura. Tubería colapsada con exposición de terreno natural, Tubería inexistente (caverna), Contrapendiente.
- Alto, se debe a dislocamientos, fisuras y erosión de pared, que permite infiltración y exfiltración del flujo, contempla los daños: desacoplamiento, dislocaciones, acero de refuerzo expuesto y erosión en plantilla, acero de refuerzo expuesto, grietas, erosión en recubrimiento interno, filtraciones y estancamiento.
- Medio, abarca daños por erosión y deterioro considerable de pared y obstrucciones, sin infiltración y exfiltración del flujo, engloba las anomalías siguientes: fisuras pequeñas, obstrucción, erosión de pared (sin exponer el acero de refuerzo), conexiones a cuerpo de tubo (tratándose de colectores), desgaste en juntas o uniones y obstrucción por basura o azolve.
- Bajo, sin anomalías presentando una conducción con flujo a superficie libre.

#### Estado Operacional

Conviene en este punto de la metodología, realizar una simulación hidráulica, para interpretar el funcionamiento del colector en su estado actual. El establecimiento de un modelo

de simulación hidráulica, tiene el objetivo de identificar de forma anticipada o forense, inundaciones y anegamientos en sectores urbanos, que provocan pérdidas materiales y ocasionalmente humanas.

En ejercicio previo debe identificarse con la mayor precisión posible, la cuenca hidrológica urbana o el área de influencia para el colector o componente del sistema de drenaje, con la cual se apoye la estimación del gasto sanitario correspondiente a las descargas domiciliarias de la población, como gasto base de un hidrograma y se añade el gasto pluvial, del que al menos se construyan dos hidrogramas asociados a mínimo un periodo de retorno de 5 años y máximo 50 años o menos, según el riesgo que se requiera contemplar.

La importancia de usar modelos y estrategias de modelación, específicas para el ámbito de la hidrología urbana, reside en que las cuencas son cada vez más afectadas por los componentes urbanos, modificando en consecuencia el escurrimiento, principalmente en magnitud y tiempo en que se producen los escurrimientos máximos, resultando muy distintos a los debidos por condiciones naturales.

El conocimiento y detección de anomalías de operación, sobre el análisis del flujo en los sistemas de drenaje, permite la flexibilidad necesaria para diseñar, verificar y evaluar el efecto de nuevos elementos del sistema de drenaje para la posible utilización de los mismos, con una baja inversión.

El resultado es un perfil de flujo del colector, que demuestre la presencia de sobrepresiones o flujo a superficie libre en tramos del conducto, si se tienen datos de aforo y niveles de superficie del agua al interior de la conducción, se podrá calibrar el modelo hidráulico y contemplar con mejor aproximación el estado actual de funcionamiento del colector.

Con relación a este análisis hidráulico, los criterios de atención son:

- Inmediato para un flujo a presión relacionado a dos periodos de retorno, mínimo de 5 años y 50 años o menos; alto para flujos a presión relacionado al menos al periodo de retorno mínimo de 5 años; medio para flujos a

superficie en tramos con contrapendientes, o tubos aceptablemente llenos; Bajo para flujo a superficie libre.

Se tienen en esta etapa, dos condiciones de evaluación, el estado físico del colector y el estado hidráulico operacional, en condiciones actuales.

#### *Edad del Colector*

Se considera en importancia el tiempo de funcionamiento del colector, se establecen los siguientes estados:

- Inmediato aquellos con edades mayores a 75 años; alto entre el rango de 50 a 75 años; medio entre 30 a 50 años y bajo para los colectores que no superan los 30 años.

La calificación de grado de daño indicados, son una sugerencia y guía, que varía, según la experiencia y criterios de los organismos responsables de la operación del drenaje a nivel mundial. Esta práctica permite conocer y valorar tres criterios, para la priorización de acciones de renovación de colectores.

Los anteriores parámetros de evaluación son básicos e indispensables, para identificar el funcionamiento de colectores en su estado actual, sus tramos con problemas y conocer posibles consecuencias futuras sin correctivos a las anomalías, valuación conocida como “sin proyecto”.

Es recomendable el estudio del medio físico alrededor de los colectores, para identificar algunos factores que han deteriorado la operación del colector, deben tomarse en cuenta aspectos geográficos, urbanos, zonificación sísmica, geotécnica, hundimientos, encharcamientos, como medios, también importantes para identificar efectos directos sobre la operación de la red de drenaje, que se desarrollaran según la información disponible y que a continuación se describen.

#### *2.3.4 Valoración del Desarrollo Urbano*

Como medio auxiliar para la valoración del impacto social o de beneficio a la ciudadanía, en prevención de problemas de salud, socavones y encharcamientos, que además afectan la economía del desarrollo social, como el valor de los bienes públicos y privados, se asocia la

cuenca y desarrollo longitudinal del colector, con el uso del suelo. De acuerdo a la institución, secretaría o al área correspondiente, se recomienda recabar el plano de desarrollo urbano del área en estudio, que detalle los usos de suelo como son: habitacionales, habitacional mixto, comercios, espacios abiertos (áreas verdes, conjuntos deportivos, espacios lúdicos abiertos) y zonas Industriales.

Se propone valorar con el siguiente criterio de prioridad de atención.

- Inmediato, el uso habitacional y habitacional mixto como el más relevante, por el objetivo social; alto, los usos de suelo con oficinas y comercio; medio, las zonas industriales; y bajo a los espacios abiertos de áreas verdes, conjuntos deportivos, espacios lúdicos abiertos.

La anterior escala se propone en complemento a los criterios y valores de evaluación del estado general actual, desde el punto de vista numérico, se recomienda, contemplar una escala simple, acorde con el número de elementos de valoración, siendo de mayor importancia a menor la siguiente escala propuesta, con valor de 4 inmediato, 3 alto, 2 medio, 1 bajo.

#### *2.3.5 Valoración de efectos por Hundimiento diferencial del suelo*

La metodología aplica en especial para suelos limos-arcillosos; por lo que, los hundimientos diferenciales del suelo, son un factor importante que hay que considerar en el diseño, mantenimiento y conservación del drenaje sanitario y pluvial, ya que de ellos depende que a través del tiempo mejore su eficiencia hidráulica o en su defecto, lleguen a trabajar en contrapendiente. Estos planos se pueden elaborar con datos históricos que se tengan dentro del área de estudio de lecturas de niveles en puntos críticos de manera constante a lo largo de los años, en caso de que la zona no presente este fenómeno provocado por el tipo de suelo, se podrá omitir en la metodología.

Se realiza un siguiente análisis hidráulico, para un horizonte de diseño de al menos 30 años tomando en cuenta los hundimientos diferenciales tanto en el nivel del brocal y de la plantilla del colector. El gasto de revisión

considera las descargas domiciliarias de la población proyectada al horizonte de planeación futura (30 años), dentro del área de influencia de la cuenca hidrológica del colector original o considerando modificaciones probables futuras y el gasto pluvial, aplicando los mismos periodos de retorno usados en la estimación hidráulica o simulaciones del estado actual de funcionamiento del colector

Se recomienda en coherencia con los anteriores análisis hidráulicos, aplicar los criterios de evaluación descritos en el apartado 1.2.2.

Esta valoración permite apreciar el impacto a futuro sin proyecto y sus consecuencias.

### 2.3.6 Valoración de Encharcamientos

Plano elaborado con ayuda de la institución, secretaría o área encargada de la recopilación de reportes de encharcamientos o reportes de prensa, identificando su causa, medida correctiva, área de afectación e incidencia a lo largo de los años dentro del área de estudio. Si la información lo permite, es posible relacionar la incidencia de encharcamientos, con las condiciones de operación hidráulica, obtenidas de los apartados (Estado Operacional) y (Valoración) de efectos por Hundimiento diferencial del suelo, además de asociarlos con los periodos de retorno analizados y los criterios de evaluación anteriormente descritos.

### 2.3.7 Valoración de Zonificación Geotécnica

La evaluación por zonificación geotécnica contempla un análisis de capacidad de carga en diferentes puntos a lo largo del colector, en donde se evalúa la relación entre la carga actuante (carga muerta más carga viva) o diseño, afectada por un factor de seguridad (factor de carga en algunos reglamentos) y la relación de resistencia suelo-tubería al aplastamiento, tanto para tuberías rígidas (tuberías de concreto) como flexibles (tuberías plásticas). Tomando en cuenta que la mayoría de las tuberías existentes, son de concreto con alguna afectación, en primera instancia se revisa la resistencia a la primera grieta de un tubo de concreto grado 1, bajo la prueba de 3 apoyos. Cabe resaltar que el valor de resistencia de la primera grieta, mismo que se compara con el valor de la carga actuante calculada, se especifica en la norma NMX-C-

402-ONNCCE-2011, El factor de seguridad aplicado es de 1 para la primera grieta de acuerdo al *Concrete Pipe Design Manual*, (ACPA, 2011). El criterio de atención considera el tipo de cemento básico aplicable a tuberías de concreto, la cimentación o plantilla tipo B es de material granular compactado, la plantilla C es de material granular sin compactar y la plantilla D es material suelto.

Si la carga actuante es menor que la carga resistente a la primera grieta, considerante para las plantillas tipo B, C y D la evaluación es bajo, si sólo se resisten las plantillas tipo “B y C”, el criterio es medio. Por otro lado, si la resistencia se presenta para plantillas tipo “B”, el criterio es alto; mientras que, si no se resiste con ningún tipo de cimentación, la evaluación es inmediata.

### 2.3.8 Valoración de Zonificación Sísmica

La metodología de análisis está basada en el método de la deformación sísmica o pseudoestático descrito en el Manual de diseño de obras civiles, diseño por sismo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015). Dicho método se basa en estimar la amplitud del desplazamiento del suelo que rodea la estructura en función de parámetros dinámicos del sitio, tales como el periodo natural y la aceleración del terreno de acuerdo con la zonificación sísmica de la estructura.

La evaluación se realiza a partir de una comparativa entre desplazamiento axial máximo de la tubería ( $U_p$ ) vs longitud de unión espiga-campana de la tubería, denominada “desplazamiento permitido (B)”.

Los criterios de atención consideran como bajo si  $U_p < B$ , medio si  $U_p = B$ , alto si  $U_p > 1.1B$  e inmediato si  $U_p > 2B$ .

### **3. INGENIERÍA BÁSICA O ANTEPROYECTO Y PROYECTO EJECUTIVO**

Una vez realizado el diagnóstico, es aplicable un ejercicio de priorización de intervenciones al drenaje y ordenar su remediación, sea para el total de la longitud de un colector o de tramos identificados con problemas o con diferentes grados de anomalías.

En todos los colectores o tramos, con mérito a remediar, se recomienda un anteproyecto o estudio de ingeniería básica, que recomiende opciones entre las técnicas de renovación disponibles, por méritos económicos, proceso constructivo y mejoras hidráulicas y estructurales que promuevan.

En esta etapa se consideran los resultados de las valoraciones anteriores y se contrastan con la generación de estados futuros de opciones de renovación, junto con simulaciones del estado funcional esperado y estimaciones básicas de costos.

### **4. ACCIONES DE RENOVACIÓN**

De acuerdo al diagnóstico o en su caso anteproyecto o proyecto ejecutivo, la propuesta de renovación contempla tres grandes acciones, bajo un adecuado análisis ingenieril:

#### **a) Reparación**

Las técnicas de reparación intentan rectificar un daño local, y contempla técnicas sin zanja. La mayoría de estas técnicas no aumenta o mejora la capacidad estructural de los componentes; únicamente repara las anomalías locales debido a que la corrosión puede alcanzar el armado y debilitar aún más la estructura en tuberías de concreto reforzado. Algunas de estas técnicas pueden ser aplicadas a cajas y pozos de visita.

#### **b) Rehabilitación**

Las técnicas de rehabilitación se basan en la intervención de un componente de la tubería en el sistema de drenaje, incorporando todo o parte del material para mejorar el estado actual. La mayoría de las técnicas son métodos sin zanja mejorando además la capacidad estructural.

#### **c) Sustitución**

Las técnicas de sustitución son aquellas en las que se construye un componente nuevo dentro de la red de drenaje, adoptando la función de la tubería deshabilitada. Estas técnicas contemplan excavación, mejorando la capacidad hidráulica y estructural.

### **5. RESULTADOS**

El diagnóstico propuesto, permite una evaluación permanente del estado o servicio que prestan los drenajes, a través de labores de campo y gabinete, que contribuyen en lo siguiente:

- Da valor a las labores de inspección con apoyo en técnicas y metodología, lo que permite dimensionar su importancia, en la planeación de acciones de mantenimiento.
- Describe un procedimiento de evaluación del estado estructural de tuberías, que identifica tipo y grado de anomalías, que afectan el estado normal o previsible del interior de los conductos de drenaje.
- Recomienda establecer un modelo de funcionamiento hidráulico, que permita conocer y evaluar la situación actual del alcantarillado, detectar alteraciones de operación y estudiar alternativas de mejora, con la flexibilidad necesaria para diseñar, verificar y evaluar el efecto de nuevos elementos del sistema de drenaje
- Tan solo el conocimiento del estado físico, funcional y edad de los colectores, permiten en lo mínimo establecer, objetivos y orden acciones para la renovación de colectores
- Resulta valioso tomar en cuenta mapas de riesgos y mapas o planos de aspectos geográficos, urbanos, zonificación sísmica, geotécnica, hundimientos, encharcamientos, para identificar importantes factores que han deteriorado la operación del colector.
- Permite una primera valoración del impacto social o de beneficio a la ciudadanía, al considerar la cuenca y desarrollo longitudinal del colector, con el uso del suelo, al procurar información como cantidad y tipo de

población a beneficiar, además que asociar esta información con el valor de catastro, se permite conocer el impacto a los bienes urbanos de la ciudad y población.

- Es posible dar forma a un Programa de renovación al reconocerse las necesidades y beneficios tangibles de proyecto, con base en el diagnóstico, evaluación y elaboración de anteproyecto o proyecto ejecutivo.

## 6. DISCUSIÓN

La conservación de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial, es de interés o utilidad pública, por su naturaleza física y costo, debe ser entendida como elemento para el desarrollo social, es una labor determinante en las perspectivas de largo plazo para el crecimiento socio económico de las urbes, pues contribuye en la salud, confianza y desarrollo de sus habitantes. Representa un servicio de bienestar social por lo que es elemental el buen funcionamiento de este y que dé cumplimiento a la NOM-001-CONAGUA-2011 en sus criterios de hermeticidad (CONAGUA, 2011) y a la NOM-002-SEMANART-1996 en criterios de calidad del agua (SEMARNAT, 1996), evitando en la medida de lo posible la falla del sistema ya que esto provocaría daños tanto en los bienes públicos como privados e inclusive daños mortales. Por lo que se requiere de acciones de mantenimiento y revisiones visuales periódicas para verificar el estado físico en el que se encuentra la red, con la finalidad de poder llevar acabo reparaciones, rehabilitaciones o sustituciones preventivas para evitar la mayor cantidad de daños y con esto disminuir los costos de inversión en infraestructura sanitaria.

## REFERENCIAS

- ACPA, (2011). *Concrete Pipe Design Manual*, American Concrete Pipe Association, Irving, TX, USA.
- ASTM, (2013). ASTM- D5242-92-2013. *Standard Test Method for Open-Channel Flow Measurement of Water with Thin-Plate Weirs*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

## 7. CONCLUSIONES / RECOMENDACIONES

Se destaca la importancia de la etapa de diagnóstico, en el deber ser de un programa de mantenimiento, con énfasis en la evaluación del deterioro para todo o en parte de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial de cualquier ciudad.

En la metodología propuesta aplicable a cualquier sitio se destacan tres análisis: 1) valoración del estado general actual, que resulta en una evaluación básica de afecciones a los elementos de la red de drenaje, esta contempla el estado físico, operacional y edad del elemento de estudio. 2) estudios complemento, que involucra las valoraciones particulares de la zona donde se encuentra el colector, como desarrollo urbano, hundimiento diferencial del suelo (aplicable principalmente a zonas de suelos limo-arcillosos) y encharcamientos. 3) valoraciones de apoyo, que se incluyen para la selección adecuada de materiales para colectores o atarjeas en su proceso de rehabilitación, considerando zonificación sísmica y geotécnica.

Para la evaluación del deterioro del elemento de estudio, se recomienda establecer una valoración numérica a cada criterio de atención, asignando el mayor puntaje a la atención inmediata y el menor a la atención baja; además de asignar un puntaje a cada valoración propuesta y obtener una media ponderada por tramo o por elemento. Esto puede realizarse de manera gráfica con apoyo de la elaboración de fichas o planos de cada uno de los rubros mencionados en la etapa de diagnóstico con el fin de facilitar la evaluación de acuerdo a los criterios explicados para los colectores o atarjeas en estudio donde se plantee su renovación.

Es recomendable llevar un histórico de reportes de encharcamientos, socavones o fallas visibles del sistema de drenaje y en consecuencia procesar esta información para su uso confiable en futuro.

- ASTM, (2014). ASTM-D5130-95-2014. *Standard Test Method for Open-Channel Flow Measurement of Water Indirectly by Slope-Area Method*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM, (2013). ASTM-D5243-92-2013. *Standard Test Method for Open-Channel Flow Measurement of Water Indirectly at Culverts*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- CFE, (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles - Diseño por Sismo CFE-IIIE*, D.F. México.
- CONAGUA, (2012). NOM-001-CONAGUA-2011. *Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba*. D.F. México, Publicación DOF 9 de febrero de 2012.
- EPA, (1991). *Handbook: Sewer System Infrastructure Analysis and Rehabilitation*. U. S. Environmental Protection Agency. EPA 625-6-91-030 October 1991. Washington, D.C., USA.
- EPA, (1999). *Folleto informativo de operación y mantenimiento del alcantarillado*, EPA 832-F-99-031. United States Office of Water Environmental Protection Agency. Washington, D.C., USA.
- Hardin, D., Messer, C. (1997). *Old Data and New Tools-Maintaining the Sewers That Need It*. Proceedings of the WaterEnvironment Federation Conference on Collection Systems Rehabilitation and O&M Speciality.
- SEMARNAT, (1998). NOM-002-SEMARNAT-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y del tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano y municipal*. D.F. México, Publicación DOF 6 de abril de 1998.

*Como citar este artículo:*

Cabrera, M., Sánchez, G., Mejía, J., Hernández, C. (2019). Evaluación del deterioro de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 111-120. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-10

***La rigurosa revisión por pares es la base de la publicación científica de alta calidad***

El equipo editorial agradece a los revisores 2019 que contribuyeron con sus conocimientos y experiencia al proceso editorial de Aqua-LAC. Gracias por su invaluable contribución a la calidad de nuestra revista.

Aldo Iván Ramírez Orozco	José Luis Genta
Aleida Yadira Vilchis Frances	Juan Alfredo Hernández Guerrero
Alfredo Jiménez Trigós	Juan Pablo Molina Aguilar
Carlos Berroeta Bustos	Juan Pombosa
Carlos Franco Domínguez	Marcela Susana Duhne-Ramírez
Carlos Javier Villa Alvarado	María del Valle Morresi
Diego Alejandro Pérez Giraldo	Marta del Carmen Paris
Fernanda Julia Gaspari	Mauro Nalesso
Filomeno Marchena	Ninell Janett Dedios Mimbela
Francisco Balocchi	Nuri Sánchez
Henrique Marinho Leite Chaves	Rafael Val Segura
Joram Gil	Roberto Mejía Zermeño
Jorge Gironas León	Rodrigo Hernán Ojeda Pinto
Jorge Victor Pilar	Santiago Gómez Dueñas
José Alejandro Vargas Baecheler	Tania Paola Robles Montero

---

## POLÍTICA EDITORIAL INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

La revista Aqua-LAC es una publicación del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (PHI-LAC). Es una revista multidisciplinar que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social.

Las contribuciones deben ser el resultado de una investigación original, adecuadamente diseñada y que contenga un título, resumen, palabras claves, introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones o consideraciones finales, agradecimientos (opcional) y referencias. Los artículos presentados deben ser originales escritos en idioma español, inglés, francés o portugués.

Los trabajos presentados en francés y portugués, deberán estar acompañados de un **Resumen Extendido** en inglés. Este resumen deberá hacer referencia a las figuras, tablas y ecuaciones presentadas en el cuerpo del artículo. La extensión del **Resumen Extendido** será de 2000 palabras mínimo.

A continuación se definen los cuatro tipos de trabajos aceptados:

- **Artículo de investigación:** es una exposición completa, original, innovadora, totalmente documentada, discutida e interpretada de un trabajo de relevancia y de impacto sobre alguna disciplina relacionada con los recursos hídricos. Entre 20 y 30 cuartillas (entre 6000 y 7500 palabras) contando inclusive aquellas con tablas y figuras.
- **Nota técnica:** corresponde a un relato sumario de un trabajo con resultados parciales, investigaciones puntuales, desarrollos metodológicos, consideraciones técnicas esenciales, y procedimientos enfocados a los recursos hídricos. Se debe poner énfasis en las recomendaciones. Máximo 15 cuartillas contando inclusive aquellas con tablas y figuras.
- **Reseña de campo:** comprende una explicación cronológica, detallada y ampliamente ilustrada de las actividades que realiza el investigador en campo. Las reseñas se publican a petición de los autores, previa autorización del Consejo Directivo y revisión por pares. Entre 10 y 20 cuartillas contando inclusive aquellas con tablas y figuras.
- **Reseña:** comprende una evaluación crítica de libros y de publicaciones técnicas. Las reseñas se realizarán por invitación de alguno de los miembros del Consejo Directivo.

### **FORMATO**

Se aceptarán solo manuscritos electrónicos en formato Word o en otro formato transferible a Word. Escritos a una columna, interlineado 1.5 líneas y que utilicen el tipo de letra Times New Roman de tamaño 12 puntos. Con números de página en la parte inferior, comenzando por la primera página. Márgenes de 2.5 cm en todos los casos. Tamaño de hoja A4. Para facilitar la revisión científica del

trabajo, se deben numerar todas las líneas del texto en forma consecutiva (en Word: diseño de página/números de línea). Los títulos de los apartados deben estar numerados en forma sencilla y se escriben en negritas con mayúsculas. Los subtítulos de los apartados, también numerados, se escriben en cursivas con mayúsculas y minúsculas. Siempre que aparezcan nombres científicos, estos deberán ser escritos de acuerdo a los registrados en el Sistema de Información Taxonómico Integrado (ITIS) <https://www.itis.gov/> siempre y cuando esté disponible.

Si excepción se utilizará el Sistema Internacional de Unidades. El separador de cantidades decimales es el punto. El separador de miles, es la coma.

Consistente con el tipo de publicación, se sugiere la siguiente estructura. Numerar los sub-apartados en una forma sencilla:

#### **Artículo / Nota Técnica**

Titulo  
1. Introducción  
2. Metodología  
3. Resultados  
4. Discusión  
5. Conclusiones / Recomendaciones  
Agradecimientos (opcional)  
Referencias  
Anexos

#### **Reseña de Campo**

Titulo  
1. Introducción  
2. Área de estudio  
3. Esquema de investigación  
4. Materiales y equipo  
5. Etapas del trabajo de campo  
6. Desarrollo  
7. Conclusiones  
Agradecimientos (opcional)  
Referencias

### **CUERPO DEL MANUSCRITO**

**Primera página (portada):** Incluirá el título del trabajo, el cual debe ser conciso y reflejar el contenido de la investigación. Los nombres de los autores, así como su afiliación (nombre completo de la institución a la que pertenece, teléfono y correo electrónico). Identificar al autor de correspondencia.

Formato de la primera página (portada):

Título en idioma original del artículo (mayúsculas y minúsculas).

Título en inglés o en otro idioma oficial de la revista (mayúsculas y minúsculas).

Nombre y apellidos de los autores (sin grados académicos), institución, e-mail, teléfono.

**Segunda página:** Incluirá el título del trabajo, los resúmenes y las palabras claves. A partir de esta página se presenta el desarrollo del trabajo.

### Formato de la segunda página:

Título en idioma original del artículo (mayúsculas y minúsculas).

Título en inglés o en otro idioma oficial de la revista (mayúsculas y minúsculas).

Resumen en idioma original del artículo (200-250 palabras).

Palabras clave en idioma original del artículo (3-6 palabras).

Resumen en inglés o en otro idioma oficial de la revista.

Palabras clave en inglés o en otro idioma oficial de la revista.

### **REFERENCIAS**

Un mínimo del 60% de las referencias utilizadas deben ser de actualidad y relevancia científica. Las referencias que aparecen en el texto deben estar presentes en la sección **Referencias** en orden alfabético y cronológico. Solo los trabajos citados en el texto deberán aparecer en la sección de **Referencias** y viceversa. Si necesita citar alguna referencia de trabajos que aún no han sido aceptados para publicación, menciónelos únicamente en el texto de la siguiente forma: (Apellido, en prep.). Para más de dos autores, **en el texto se usará *et al.*** independientemente del idioma original del manuscrito. En el apartado de **Referencias** se deben citar todos los autores. En todos los casos, cuando sea posible, se solicita incluir el DOI (o en su caso el ISBN en libros) de las referencias citadas para facilitar la validación cruzada (Cross Check). Se solicita el Sistema de Referencias APA (*American Psychological Association 6th edition*). Se recomienda utilizar programas en línea para escribir las citas. Por ejemplo: <http://www.citethisforme.com/>

A continuación se muestran algunos ejemplos.

#### **Artículo**

Autor. (Año). Título. *Revista*. Volumen. Páginas. DOI.

Golian, S., Saghafian, B., Elmi, M., & Maknoon, R. (2011). Probabilistic rainfall thresholds for flood forecasting: evaluating different methodologies for modelling rainfall spatial correlation (or dependence). *Hydrological Processes*, 25(13), 2046-2055. doi: 10.1002/hyp.7956

**En el texto** (Golian *et al.*, 2011)

#### **Libro**

Autor. (Año). *Título*. Editorial. Ciudad. Estado o Provincia. ISBN.

Autor. (Eds). (Año). *Título*. Editorial. Ciudad. Estado o Provincia. ISBN.

Bivand, R., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R*. Springer-Verlag New York. ISBN: 978-1-4614-7617-7

**En el texto** (Bivand *et al.*, 2013)

### Informe o memoria de congreso

Autor. (Año). Título de la ponencia. *Título del simposio o congreso*. Institución organizadora o editorial. Ciudad, Estado o Provincia.

Basile, P., García, M., & Riccardi, G. (2011). Calibración de funciones para desagregar en vertical velocidad y concentración de sedimentos en suspensión en el río Paraná. *Quinto Simposio Regional sobre hidráulica de ríos*. Instituto de Recursos Hídricos (IRHi) - Instituto Nacional del Agua (INA). Santiago del Estero, Argentina.

**En el texto** (Basile *et al.*, 2011)

### Capítulo de libro

Autor. (Año). *Título del capítulo*, páginas del capítulo. **En** editor (ed.) para libros español.  
**In** para libros en inglés. Título. Editorial. Ciudad, Estado o Provincia. ISBN / DOI.

Saha, A., & Setegn, S. (2015) *Ecohydrology for Sustainability of IWRM: A Tropical/Subtropical Perspective*, 163-178. In: Setegn S., Donoso M. (eds). *Sustainability of Integrated Water Resources Management*. Springer, Cham., Switzerland. ISBN: 978-3-319-12194-9 / doi: 10.1007/978-3-319-12194-9\_10

**En el texto** (Saha & Setegn, 2015)

### Tesis

Autor. (Año). *Título*. Tipo de Tesis, Universidad, Ciudad, Estado o Provincia.  
Si la ciudad es poco conocida internacionalmente, mencione el país.

Martínez-Miranda, G. (2017). *El valor cultural del geopatrimonio en el geoparque Mixteca Alta, Oaxaca*. Tesis de licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

**En el texto** (Martínez-Miranda, 2017)

### Páginas web

Autor, organismo o institución editora. Título de la página. Lugar de origen del servidor, [fecha de acceso a la información]. Dirección electrónica.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. Snieg.mx (online). [Consultado el 16 de abril de 2018]. Disponible en: <https://www.snieg.mx/cni/>

**En el texto** (INEGI, 2018)

## **FIGURAS Y TABLAS**

Las figuras y tablas se incluyen en el cuerpo del artículo en la posición que ocupan. En baja resolución pero visibles y claras para realizar la revisión. Para el caso de las **Reseñas de Campo**, las figuras, dibujos e ilustraciones, pueden ser presentados a mano libre; siempre y cuando sean claras y de buena calidad. Las gráficas y tablas se presentarán con el formato para Artículo.

Una vez que el artículo es aceptado, las figuras, gráficas, dibujos, ilustraciones y fotografías serán solicitadas en formato electrónico (digitales) preferentemente en GPS o TIFF, de 300 DPI (color) y 1200 DPI (blanco y negro). Deberán ser enviadas debidamente identificadas conteniendo un número que deberá ser consistente con su aparición en el manuscrito y con un breve título descriptivo. Las tablas deben ser elaboradas en el formato de Word, enumeradas cronológicamente. Las mismas deberán estar citadas en el texto en un orden ascendente de numeración a medida que son descritas. Las tablas y figuras deben utilizar el Sistema Internacional de Unidades. La leyenda de las tablas se escribe en la parte superior. La leyenda de las figuras se escribe en la parte inferior.

## **ECUACIONES**

Las ecuaciones son numeradas consecutivamente en el orden y la posición que ocupan en el texto. Deben ser elaboradas con el editor de ecuaciones de Word o MathType.

## **ENVÍO DEL MANUSCRITO**

Los documentos deben enviarse exclusivamente en formato electrónico, vía correo electrónico al Editor en Jefe de la revista Aqua-LAC: [aqualac@uaq.mx](mailto:aqualac@uaq.mx) o [aqualac@unesco.org](mailto:aqualac@unesco.org)

**Se debe enviar el texto del artículo en formato Word,** acompañado de una **carta de presentación en PDF firmada por el autor de correspondencia.** En la carta de presentación se debe solicitar la revisión y eventual publicación del artículo. Se debe mencionar que el trabajo es original, que no ha sido publicado anteriormente y que no está sometido a otra revista. También se debe mencionar en la carta de presentación la contribución principal del trabajo en el ámbito científico. Se recomienda que al menos el autor de correspondencia incluya su número ORCID <https://orcid.org/>

Los autores pueden sugerir un máximo de tres revisores para su trabajo. Los nombres, direcciones, campo del conocimiento y el correo electrónico de los revisores propuestos, se incluirán en un **documento PDF adjunto, diferente de la carta de presentación.**

Todos los artículos enviados a la revista serán sometidos a un análisis de plagio.

## **PROCESO DE REVISIÓN**

Todos los manuscritos sometidos a publicación serán revisados por al menos dos revisores calificados, designados por el Comité Editorial. Este proceso se lleva a cabo a través de la metodología de pares ciegos o “*double-blind review*”, en el que se mantiene el anonimato de los autores para los revisores al momento de corregir y se mantiene el anonimato de los revisores en todo momento, incluso después de la publicación.

Un manuscrito puede ser aceptado, aceptado con condiciones, o rechazado con la debida justificación en todos los casos.

En el caso de que haya comentarios, el manuscrito será devuelto al (a los) autor(es) para que respondan a los mismos.

El (los) autor(es) tendrán 15 días naturales para devolver el manuscrito modificado al Editor en Jefe. **Se deberán indicar claramente los cambios realizados** en el texto o en su caso, enviar una declaración escrita sólidamente fundamentada del motivo por el cual no han acogido los comentarios de los revisores.

## **DERECHOS DE AUTOR**

Los autores de manuscritos aceptados para publicación en la revista de forma automática, dan su consentimiento para que los derechos de autor sean transferidos a la revista para su publicación sin fines comerciales.

## **RESPONSABILIDAD**

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”.*

---

### **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*

---



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

70  
1949 - 2019

**Oficina de Montevideo**

Oficina Regional de Ciencias  
para América Latina y el Caribe

## UNESCO

Programa Hidrológico Internacional  
Oficina Regional de Ciencias  
para América Latina y el Caribe

*International Hydrological Programme  
Regional Office for Science  
for Latin America and the Caribbean*

Revista científica del Programa Hidrológico Internacional  
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

[www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/natural-sciences/water-ihp-lac/revista-aqualac/](http://www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/natural-sciences/water-ihp-lac/revista-aqualac/)

**Aqua-LAC** 10 años  
Revista del Programa Hidrológico Internacional  
para América Latina y el Caribe