



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

2

**VOL. 12
SEPTIEMBRE 2020**

*Revista del Programa Hidrológico
Intergubernamental para América Latina y el Caribe*

*Journal of the Intergovernmental Hydrological
Programme for Latin America and Caribbean*

Publicado en el 2020 por el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Published in 2020 by the Intergovernmental Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)

ISSN 1688-2881

© UNESCO septiembre 2020

Fotografía de portada: © Eduardo Planos

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

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

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

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

Dr. Luis P. Piera 1992, 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

Instituto Mineiro de Gestão das Águas, IGAM, Brasil

Waldo Lavado-Casimiro

Facultad de Meteorología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Henrique Marinho Leite Chaves

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

Manuel Fernando Luna Lemus

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

Ninell Janett Dedios Mimbela

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI, Perú

Poliopro Fortunato Martínez Austria

Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería, México

Lilian del Castillo Laborde

Facultad de Derecho de la Universidad de Buenos Aires, Argentina

Mauro Nalesso

Water & Sanitation Division Inter-American Development Bank, USA

Evens Emmanuel

Université Quisqueya, Haiti

Marta del Carmen Paris

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

Pablo A. Garcia-Chevesich

University of Arizona, USA

Jorge Víctor Pilar

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

Fernanda Julia Gaspari

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

Diego Alejandro Pérez Giraldo

Universidad Libre de Colombia

Hugo G. Hidalgo

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

Mauricio Pinto

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

Lili Ilieva

Senior Analyst, ECo Ltd.

Denilson Teixeira

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

STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF

M. Alfonso Gutiérrez López

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

Miguel Doria

Editor Ejecutivo / *Executive Editor*
Editor Asociado Inglés

José Leopoldo Vargas Baecheler

Editor Asociado Español
Universidad de Concepción, Chile

Henrique Marinho Leite Chaves

Editor Asociado Portugués
Universidad de Brasilia, Brasil

Evens Emmanuel

Editor Asociado Francés
Université Quisqueya, Haití

José Alejandro Vargas Díaz

Responsable de herramienta OJS

Luis Avilés Ríos

Responsable de Indexación

Sabrina Cupeiro

Asistente de Edición

Ivonne Monserrat Cruz Paz

Asistente de Indexación

Marcela Salas Salazar

Asistente de herramienta OJS

Jacqueline Gómez Martínez

Asistente de Arbitraje

EDITORIAL

Cuando inició Aqua-Lac nadie imaginó la dimensión de lo que teníamos entre las manos. Recuerdo que fue hace más de diez años y tengo aun en mi mente aquella reunión de Comités Nacionales cuando se aprobó su creación. Después fue presentada durante el Día Mundial del Agua el 22 de marzo de 2009. Estuvimos felices, logramos algo que habíamos platicado como si fuera sólo un deseo. Estimado lector, ahora tiene entre sus manos el número de Aqua-LAC que presenta el artículo #200. La historia de nuestra revista empezó con un artículo sobre la *Gestión apropiada el Recurso Hídrico Subterráneo en América Latina. Lecciones de Experiencias Internacionales* (#1). Es interesante relacionar este inicio con el tema de la VII Fase del PHI (2008-2013) “Interacciones del agua: sistemas en peligro y desafíos sociales”. En aquel entonces el Programa enfatizaba sobre la dimensión social de la gestión de los recursos hídricos. En coincidencia, el artículo #50 publicado durante la misma fase, expone también una investigación sobre el tema de los recursos hídricos subterráneos: *Utilización de información procedente de teledetección para el análisis de sistemas subterráneos*. Años después durante la VIII Fase del PHI (2014-2021) “Seguridad hídrica: respuestas a los retos locales, regionales y globales”; se publicaron los artículos #100 *Análisis integrado del río Negro: un cauce de gran ancho en Colombia mediante trazadores y el modelo fluvial clásico de Leopold-Maddock* y el artículo #150 *El agua, el ingreso y la pobreza*. Ambos trabajos son un ejemplo del principal desafío para el Siglo XXI: la seguridad del agua; ese era el lema de esta importante Fase del PHI, pero lo más significativo; se hace énfasis en la acciones para poner a la ciencia en acción. Es ahora en donde nos encontramos. Doscientos artículos publicados, nuestra revista es más que un medio de divulgación científica, es un punto de unión entre colegas amigos, lectores y sobre todo un instrumento de referencia de nuestros trabajos científicos. Es interesante también comentar que el artículo más descargado a la fecha es el que se presentó en el Vol. 4(1), éste, exhibe una detallada investigación sobre la *Huella Hídrica de América Latina: retos y oportunidades*. Esto pone de manifiesto nuestro eterno compromiso sobre nuestras actividades y sus efectos sobre el agua. Finalmente, hay algo muy significativo en este número de Aqua-LAC. Este número nació y se desarrolló con muchas dificultades durante una pandemia. Un año que todos recordaremos como un año de lucha, derrotas y victorias. Este número de Aqua-LAC también es especial, porque reconocemos y recordamos a uno de nuestros ilustres mosqueteros que se adelantó en el camino; Joram Gil. Él nos dejó sin embargo, una ruta bien trazada para no perder el rumbo y continuar con la comprensión y el avance de nuestros conocimientos por los recursos hídricos. Dedicamos el artículo #200 a Joram como un homenaje a nuestro querido y extrañado amigo.

Dr. Alfonso Gutiérrez-López
Editor en Jefe

EN MEMORIA

11 de julio 2020

Joram Matías Gil Laroj



Trabajo en equipo, capacidad gerencial innata, amistad, risas, diversión, inspiración, aprendizaje... ¡ mucho más se puede decir de nuestro amigo Joram !... ahora todo eso queda en nuestro recuerdo nuestros corazones; quién fue Joram, todos lo sabemos. Brillante ingeniero civil egresado de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) Maestro en ingeniería sanitaria y docente de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la USAC. Maestro en Liderazgo de la Universidad de San Pablo y especialista en recursos hidráulicos en la Universidad de Hannover, Alemania. Una gran inspiración para nuestra labor cotidiana. Nuestro entorno de trabajo queda impregnado con su presencia y su entusiasmo, con sus consejos y sus charlas. Nuestro querido amigo estará siempre con nosotros, estamos seguros de ello. Desde ahora, el camino trazado para nosotros será transitado en compañía de Joram. Sabemos que el futuro es el presente y que el presente se transita por el camino de los recuerdos. Joram nos enseñó del trabajo colectivo, la paciencia y la eficiencia. Su amplia capacidad gerencial lo llevó a ser presidente de la Junta Directiva del Colegio de Ingenieros de Guatemala, presidente de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Sanitaria y Ambiente y coordinador del Centro de Educación Continua del Colegio de Ingenieros de Guatemala. Ha sido un fuerte impulsor de la gestión integrada de los recursos hídricos en su país, coordinando el Eje Agua de la Fundación Solar y líder del proyecto que implementó por primera vez un caso concreto en la cuenca del río Naranjo con el apoyo de la cooperación holandesa; que es reflejado en este número de Aqua-LAC. Al recordar los proyectos como éste y que realizamos en su compañía, queremos rendir un homenaje dado que estará en nuestras vidas como profesional calificado y brillante coordinador de la Cátedra de Sostenibilidad del Recurso Hídrico de la UNESCO. Con este trabajo queremos rendir un homenaje a la memoria de nuestro querido amigo, quien siempre buscaba compartir su experiencia y entusiasmo con nosotros, tenía un consejo para quien lo pidiera y siempre nos motivaba a mejorar día a día. Al igual que nuestras manos se unen para rezar, las mismas actúan sobre los teclados de nuestras computadoras para rendir un homenaje diario a quien alzó el vuelo anticipadamente. Dicen que la libertad es un camino oscuro cuando estás caminando solo; nosotros decimos que nuestro camino estará ahora guiado por un gran amigo que vivirá siempre en nuestros corazones. Vaya por tanto este número de Aqua-LAC con el artículo doscientos para recordarte y tenerte siempre presente. Gracias Joram, Dios bendiga a los ausentes.

Con cariño, tu familia, tus compañeros, tus colegas, tus alumnos y amigos siempre.

CONTENIDO / CONTENTS

Alternativas de obras hidráulicas para reducir el tiempo de formación de una brecha de ruptura en cortina de la presa <i>Waterworks alternatives to reduce the time of formation of a dam break breach</i>	1
Miguel Ángel Sánchez Quijano, Carolina Miguel González, Bruno Miguel Paz, Eduardo Planos Gutiérrez, José Vargas Baecheler. [Artículo de investigación]	
Aprovechamiento de los sedimentos de los embalses como nutrientes para la fertilización de suelos agrícolas en la República Dominicana <i>Use of reservoir sediments as nutrients for the fertilization of agricultural soils in the Dominican Republic</i>	15
Bernardo Segura L., Rita María Ferreira da Fonseca. [Artículo de investigación]	
Avances en el pronóstico operacional de corto plazo y la evolución futura de largo plazo del fenómeno de la turbiedad en el río Maipo <i>Advances in the short-term operational forecast and the long-term future evolution of the turbidity phenomenon in the Maipo River</i>	37
Carlos Poblete, Francisco Suárez, Sebastián Vicuña, Carolina Meruane, Alberto de La Fuente, Jorge Reyes. [Artículo de investigación]	
Análisis de Frecuencias de Crecientes No Estacionario con una y dos Covariables <i>Non-stationary Flood Frequency Analysis with one and two Covariates</i>	47
Daniel Francisco Campos Aranda. [Artículo de investigación]	
El Reto de la Sostenibilidad Hídrica en Panamá; perspectiva urbana de su manejo integrado para un país interoceánico <i>The Challenge of Water Sustainability in Panama; urban perspective of its integrated management for an inter-oceanic country</i>	62
Emilio Messina. [Reseña]	
Daños económicos y sociales por huracanes e inundaciones en México: periodo de 2010 a 2015 <i>Economic a social damages by hurricanes and floods in Mexico: period from 2010 to 2015</i>	67
Juan Pablo Molina-Aguilar, Alfonso Gutiérrez-López. [Nota técnica]	

Diez años de investigaciones en cubiertas vegetadas de tipo extensivo. Una síntesis de los resultados obtenidos	
<i>Ten years of research on green roof extensive type. A synthesis of the results obtained</i>	78
Rosatto, H., Moyano, G. P.; Cazorla, L.; Meyer, M.; Laureda, D.; Pérez, D. Bargiela, M.; Gamboa, P.; Olivieri, A.; Sbarra, G.; Aulestia, M.; Epstein, Y. Viceconte, F.; Simonyan, M.; Requejo, I. M.; Daniel, A.C.; Miranda, B., Rocca C.	
	[Nota técnica]
Seguridad hídrica y gobernanza en el abastecimiento de agua. Déficits y desarrollo de la capacidad institucional para enfrentar los desafíos sanitarios. caso: provincia de Santa Fe (Argentina)	
<i>Water security and governance in water supply. Deficits and development of institutional capacity to face sanitation challenges. case: Santa Fe province (Argentina)</i>	85
Luis Antonio Traba, Marta del Carmen Paris, Antonio Paz González.	
	[Artículo de investigación]
El proyecto GIRH en la cuenca del río El Naranjo: Síntesis, logros y vigencia a quince años de su formulación	
<i>The IWRM project in the El Naranjo river basin: Synthesis, results and relevance fifteen years after its formulation</i>	100
Joram Gil, Marcelo Gaviño Novillo, Víctor Mux Caná	
	[Artículo de investigación]
Estrategias de gestión para el abastecimiento sostenible de agua segura a pequeñas comunidades del noroeste de la provincia de Santa Fe (Argentina)	
<i>Management strategies for sustainable safe water supply to small northwest communities of the province of Santa Fe (Argentina)</i>	120
Luciano Sánchez, Mario Basán Nickisch, Marta Paris	
	[Artículo de investigación]



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Alternativas de obras hidráulicas para reducir el tiempo de formación de una brecha de ruptura en cortina de la presas

Waterworks alternatives to reduce the time of formation of a dam break breach

Miguel Ángel Sánchez Quijano^{1*}, Carolina Miguel González², Bruno Miguel Paz³
Eduardo Planos Gutiérrez⁴, José Vargas Baecheler⁵

Recibido: 14/06/2020

Aceptado: 6/08/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

A través del análisis de ruptura de la presa, se identificaron los riesgos de inundación que surgen debido a una posible falla de la estructura por la ruptura de la cortina. Se consideró minimizar los daños sufridos como resultado de esta contingencia, así como establecer un sistema de advertencia efectivo. Se tuvo en cuenta las simulaciones del comportamiento hidráulico de este fenómeno a escala de tamaño, tanto en el laboratorio como en el software, colocando diferentes estructuras alrededor de la presa, para comparar y descubrir si hay un cambio significativo que pueda proporcionar una óptima solución a este problema. Se exponen también ejemplos de cómo en Cuba y Chile se conceptualiza este problema y se vislumbra la oportunidad de compartir experiencias en el tema en LAC.

Palabras clave: Ruptura, Simulación, Software, obra hidráulica, presa, canal experimental

Abstract

Through the analysis of the dam's break, the risks of flooding that arise due to a possible failure of the structure due to the break of the dam were identified. It was considered to minimize the damages suffered as a result of this incident, as well as to establish an effective warning system. Simulations of the hydraulic behavior of this phenomenon on a size scale were taken into account, both in the laboratory and in the software, placing different structures around the dam, to compare and discover if there is a significant change that can provide an optimal solution to this problem. There are also exposed examples of how this problem is conceptualized in Cuba and Chile, and the opportunity to share experiences on this subject in LAC is visualized.

Keywords: Dam break, Simulation, Software, Hydraulic works, Dam, Experimental channel

1 Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Chetumal, México miguel.halo199611@gmail.com

2 Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Tepic, México. carolinamglez@hotmail.com

3 Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ Universidad Autónoma de Querétaro, México. brunopaz57@gmail.com

4 Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba. e_planos@yahoo.com

5 Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. jvargas@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las presas desempeñan un papel importante en la infraestructura hidráulica. Son construidas, entre otras razones, para beneficiar el desarrollo económico de una región o país, involucrando grandes inversiones de recursos financieros, naturales y humanos. Están compuestas por tres estructuras: el vertedor, la obra de toma y la cortina. Esta última, generalmente está armada de tierra, siendo el uso de estos materiales una influencia de falla debido a su vulnerabilidad en comparación a presas de concreto armado (Francisco, 2013).

Las estructuras deben ser proyectadas de tal forma que soporten las cargas de cualquiera de las fuerzas que puedan incidir sobre ésta durante el tiempo para la cual fue diseñada. Pero la experiencia ha demostrado que suele dedicarse mucho tiempo al diseño estructural y, contrariamente, un tiempo relativamente corto a los cálculos hidrológicos e hidráulicos, en especial a la determinación de los elementos de las avenidas, como la relación caudal máximo y volumen de agua; y la sucesión de caudales máximos (Matakiev, 1973).

En el caso de México, el 58% de las cortinas son de tierra, materiales graduados y enrocamiento (Arreguín-Cortés, 2013). En Cuba el 98% de las presas son de materiales sueltos. Existen múltiples causas que originan el rompimiento de la cortina por desbordamiento o por falla estructural, como son los deslizamientos, terremotos y las grandes precipitaciones. (Hooshyaripor et al., 2017). En este sentido, el primer quebrantamiento al cual se le hicieron simulaciones (Hervouet, 2000; Valiani et al., 2002), fue en el caso de Malpasset, Francia, en 1959.

En Cuba han ocurrido varios fallos de presas por rebase de la cortina, y esta ha sido la causa que más ha dañado las presas cubanas en los últimos 40 años (Molina et al, 2016; González et al, 2017). En catorce presas ocurrió este fenómeno, nueve de ellas colapsaron y en una se ejecutó el colapso intencional. Dada la cantidad mayoritaria de presas de tierra en Cuba, el tema que se aborda en este artículo es de particular importancia para la hidráulica cubana.

Según otros estudios, se ha logrado evitar el desbordamiento, a partir de la implementación de medidas de emergencia. Tal es el caso de la presa Attabad, en Pakistán (Chen et al., 2017). Incluso se han comparado dos desastres por ruptura de cortinas ocurridas en Bangladés y Japón, con simulaciones

para conocer si existe alguna semejanza entre ambos sucesos. (Islam & Tsujimoto, 2012). En México, Chile y Cuba también se han realizado estudios por medio de simulación. En México se puede ejemplificar el caso de la presa de “la Parota” en el estado de Guerrero, con lo que se pudo conocer el comportamiento del agua y generar un mapa para establecer puntos de inundación en la zona (Ernest Bladé, 2009).

La ruptura de una presa puede ocasionar fuertes inundaciones aguas abajo, este tipo de falla provoca, por lo general, inundaciones más catastróficas, en comparación con los causados por las precipitaciones (Hooshyaripor et al., 2017).

Además de los graves daños ambientales, un evento de este tipo puede causar grandes perjuicios económicos y sociales a los habitantes de la zona de aguas abajo. La sensibilidad de la población frente a ellos, depende en buena medida de los tipos de riesgos, de su exposición a los mismos y de la percepción del riesgo al que están expuestos.

Para resolver esta problemática, suelen existir normas legales y técnicas relacionadas con el diseño y la seguridad de las presas. En el caso de México existe la “Ley general de protección civil” y la norma NMX-AA-175, cuyo contenido establece los requisitos que deben cumplirse para la elaboración de un Plan de Acción ante Emergencias (PAE), su implementación en los casos de: una descarga extraordinaria, la inadecuada operación de las obras accesorias y/o la eventual falla de alguno de los componentes de la presa. (Secretaría de Economía, 2015; Secretaría de Servicios Parlamentarios, 2013). En el caso de Cuba existen normas técnicas ingenieriles para la determinación de los parámetros de diseño y seguridad de las obras, tanto desde el punto de vista hidrológico como ingeniero geológico; una Ley Nacional de Defensa que incluye lo relacionado con la protección civil y la Directiva 1 del Presidente del Consejo de Defensa Nacional que, entre múltiples aspectos, establece los estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo, incluyendo en ellos las inundaciones por rotura de obras hidráulicas. En el caso de Chile, a pesar del elevado riesgo sísmico y significativa actividad volcánica, por un lado, la relevancia de la actividad minera en la construcción de presas para la disposición de relaves, y del sector privado en general, y una geografía comprendida entre la cordillera de Los Andes y el mar, y un extenso territorio que queda expuesto a regímenes

climáticos muy distintos, no existen normas técnicas o leyes unificadas que relacionen el diseño y seguridad de presas. Los temas están considerados en el Código de Aguas aprobado en 1981, y diferentes Reglamentos del Ministerio de Obras Públicas, de Minería y del Interior y Seguridad Pública.

Estudiar la evolución de la brecha en una cortina adquiere cada vez mayor importancia. Por lo que este trabajo se basa, principalmente, en investigaciones realizadas en México; así como también describe los enfoques utilizados en Chile y en Cuba. En las experiencias mexicanas, que constituyen a base de este trabajo, se utilizaron métodos de modelación perfeccionados a lo largo de los años de trabajo, resaltando la modelación unidimensional, como principal exponente (Wu & Wang, 2007); también se han usado simulaciones bidimensionales, que permiten observar el comportamiento del tirante y la velocidad (Hervouet, 2000; Xia et al., 2010). Por otra parte, existen métodos basados en la modelación tridimensional, que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, promediadas por Reynolds (RANS), utilizando una metodología de volumen finito, para presas cuyos dominios son irregulares (Marsooli & Wu, 2014). Del mismo modo, los modelos 1D y 2D provienen de ecuaciones formulados de Saint Venant. (Bladé et al., 2014; Gunawan, 2013; USACE, 2008).

Hasta ahora, la mayoría de los estudios se han concentrado sólo en el rompimiento de la brecha y su evolución incluyendo la vegetación (He et al., 2017); en cascadas (Xue et al., 2011); con una sola pendiente (Wang & Pan, 2015); daños estructurales (Aureli et al., 2015); e incluso para desagües de fondo (Pozo et al., 2014).

A pesar de los múltiples trabajos realizados en México y Chile, sobre la evolución de una brecha, en la experiencia mexicana revisada para este artículo, no aborda cómo reducir los riesgos aguas abajo; mientras la práctica en Cuba si prevé esta situación. Las metodologías deben de incluir además de cómo evitar una ruptura de brecha y cómo disminuir los daños que puedan ocurrir si ésta se rompe y sobre todo evitar la pérdida de vidas humanas. En

correspondencia con lo anterior, este trabajo intenta aportar un enfoque novedoso a lo ya expuesto, con el principal objetivo de evaluar el comportamiento de la presa, probando alternativas de obras hidráulicas colocadas aguas arriba de la cortina, ya que si se reduce la velocidad de impacto con la que el agua llega a la brecha, los daños serían reducidos; y con la finalidad de que estas estructuras reduzcan en gran medida el tirante y las velocidades aguas abajo.

Sería importante examinar con mayor detalle una cantidad suficiente de estructuras con diferentes características, para así poder obtener la mejor solución para la protección de las cortinas ante una brecha. Sin embargo, debido a limitaciones de carácter práctico, este documento no puede pretender aportar una revisión exhaustiva de las mismas, por lo que para propósitos de este estudio se limitará a un ensayo de elemento base y siete ensayos de estructuras hidráulicas, los cuales se realizarán de forma experimental en laboratorio, y mediante la modelación 2D por computadora comparando ambos resultados.

Se demuestra mediante el manejo de modelos experimentales, matemáticos y análisis multivariado, que el empleo de obras hidráulicas aguas arriba de una presa, logran disminuir los tirantes, la velocidad aguas abajo y los arrastres de sedimentos, obteniéndose tiempos razonables para la alerta temprana y se reduce los riesgos por desbordamientos.

2. Metodología

2.1 Modelación Experimental

El experimento se desarrolló en el laboratorio de hidráulica en la Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, con apoyo de un canal de fondo móvil a base de acrílico de 4.00 m de largo, 0.61 m de ancho y 0.15 m de alto, con una pendiente de 0.1% (figura 1). Potenciado con una bomba de agua que posee un gasto de 0 a 7 l/s. Se controló el flujo a una medida estándar entre todas las pruebas de 1 l/s.



Figura 1. Sección vista en planta del canal de fondo móvil (acotación m)

Se ensamblaron ocho elementos idénticos a escala de presas, a los cuales se les aplicaron el gasto anteriormente dicho (figura 2). A varios de ellos se les colocó muros de contención alrededor del abanico generado cuando la brecha se rompe, Mientras que, a

la primera que fungió como elemento de control, no se le aplicó estructura adicional alguna, con el fin de observar el comportamiento de la ruptura sin protección.

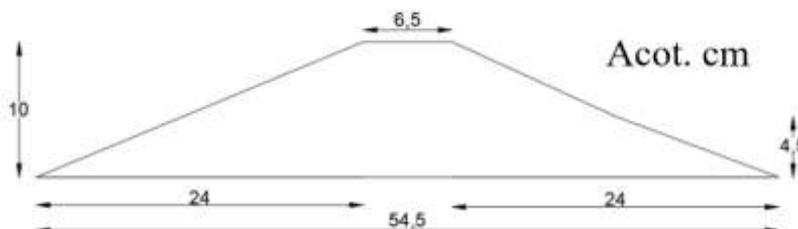


Figura 2. Forma de la presa a escala. (Acotación cm)

Se logró el objetivo en dos procesos. En primer lugar, mediante hecho real, utilizando el hardware “ARDUINO”, que permite un análisis comparativo entre los tirantes aguas arriba y aguas abajo; midiendo la altura mediante sensores de ultrasonido, además de mediciones de variables mediante un “Vernier”; y posteriormente se simula este experimento en una computadora con el software “IBER”, (Bladé et al., 2014).

2.1.1 Escala del modelo

El modelo tiene un diseño promedio para múltiples presas de terracería construidas en la República Mexicana; con una escala a 1:100, para facilitar el proceso experimental y el proceso computacional. Lo anterior facilitó realizar las modificaciones técnicas de conversión del gasto necesario para la ruptura de presa, por medio de semejanza dinámica; empleando la siguiente ecuación cuyo resultado se obtiene de la Ecuación de Semejanza de caudal.

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \lambda^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

donde

Q_p es el gasto de proyecto

Q_m es el gasto del modelo

λ es el factor de escala

2.2 Modelación numérica

Como sucede en varios casos, las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos, a considerar en el modelo hidráulico, no se pueden resolver de manera analítica; por lo que es de importancia aproximarlos por medio de procesos computacionales, en este caso manipulando la ecuación de “Saint Venant”. La esencia de este método es sustituir los sistemas de ecuaciones parciales que rigen el fenómeno en el estudio, por sistemas de ecuaciones diferenciales, proporcionando valores en los puntos de la malla, mediante la solución de métodos explícitos e implícitos, los cuales están regidos por cierto intervalos de tiempo.

IBER, es un software libre que trabaja a partir de un modelo numérico matemático bidimensional para la simulación de flujo superficial, resolviendo las ecuaciones de “Saint. Venant”, creado desde la administración pública española en contribución con el grupo de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente GEAMA (Universidad de Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña y el Centro Internacional de Métodos numéricos en Ingeniería) (Bladé et al., 2014).

2.2.1 Ecuaciones

El software IBER tiene la capacidad de calcular el comportamiento hidráulico mediante la ecuación de “Saint Venant” en dos dimensiones, contemplando

los efectos de turbulencia y rozamiento superficial por viento (Bladé et al., 2014):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) = -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \quad (4)$$

en donde h es el tirante, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al

rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y V_t es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho gh \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad \tau_{b,y} = \rho gh \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (5)$$

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad

del viento a 10 m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10} \quad (6)$$

donde, $V_{x,10}$, $V_{y,10}$ son las 2 unidades de la velocidad del viento a 10 m de altura, $|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10 m de altura y C_{VD} es un

coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión:

$$|V_{10}| < 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

$$|V_{10}| > 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} + 2.25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5.6}{|V_{10}|}\right)^2 \quad (8)$$

Todas las funciones y parámetros que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluyendo el coeficiente de Manning y la velocidad del viento) pueden imponerse de forma variable tanto espacial como temporalmente. La viscosidad turbulenta se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las

ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. IBER incluye 3 modelos de turbulencia promediados en profundidad: el modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y el modelo k-ε de Rastogi y Rodi. En el modelo parabólico se calcula la viscosidad turbulenta como:

$$v_t = 0.068u_f h \quad u_f = \sqrt{\tau_b/\rho} \quad (9)$$

siendo u_f la velocidad de fricción de fondo. Utilizando la fórmula de Manning para calcular la

fricción de fondo se obtiene la siguiente expresión para la viscosidad turbulenta:

$$v_t = 0.068\sqrt{gn|U|h^{\frac{5}{6}}} \quad (10)$$

3. Resultados

3.1 Comportamiento del abanico

Como punto inicial, se debe entender el comportamiento del abanico en el elemento de control. Por lo consiguiente, se determinó que al ingresar un gasto de 1 l/s, permitió delimitar que la

llegada a la altura a la brecha se prevé un tiempo aproximado de 80s para la simulación, además de tener el lapso en que el abanico se abre y erosiona el material, el cual no es más de 15s entre cada uno de los elementos que se realizaron en el modelo experimental (figura 3).

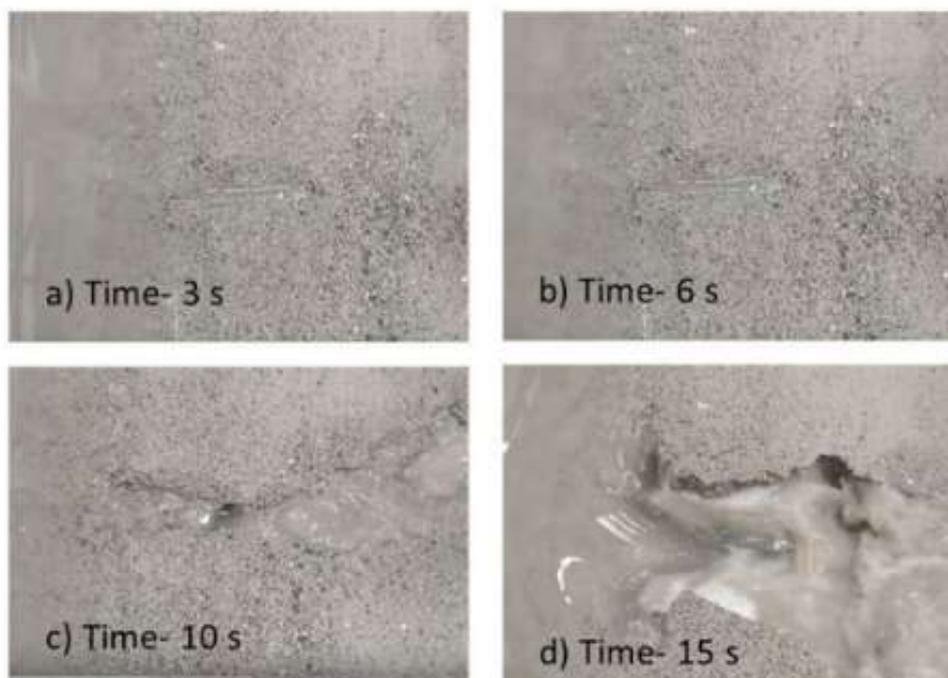


Figura 3. comportamiento de apertura del abanico

3.2 Geometría de arco

Durante el proceso experimental de las obras de alternativas de hidráulica, se observó que se presenta una formación de arco alrededor de la apertura dando así la forma geométrica de segmento circular, donde la apariencia fue variando debido a los distintos elementos estructurales colocados (figura 4).

Algunas variables a simple vista no son posibles de obtener, por lo que se concluyó por calcularse apoyados por el manual de fórmulas técnicas que

posee la solución este tipo de fracción, para obtener datos como área, radio y el ángulo (figura 5).

3.3 Análisis multivariado

Se consideró para el estudio el uso de un análisis multivariado, métodos estadísticos que permite analizar al mismo tiempo conjuntos de datos variables. En este caso se orientó en utilizar el método de análisis de conglomerados (clusters), esta observación nos permite agrupar casos, jerarquizar variables y relacionarlos entre sí. Dado que durante el proceso experimental se generaron alteraciones al

abanico, se pudo apreciar que cada uno de lo caso presentó cambios en dimensiones y profundidades, lo que otorga las variables como se muestra en la tabla 1. Cabe destacar que el caso 1 es el elemento base con el cual se comparó las obras. Con los resultados obtenidos se planteó el uso de múltiples métodos, que

posterioridad dieron resultados de gráficas, que permitieron conocer de entre las múltiples estructuras como se asemejan y la jerarquización de las más importante, teniendo en cuenta la reducción de riesgos y daños que genera la apertura de la brecha.



Figura 4. Forma del abanico

$$\alpha = 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{s}{2r}\right) \tag{11}$$

$$r = \frac{h}{2} + \frac{s^2}{8h} \tag{12}$$

$$A = \frac{h}{6s}(3h^2 + 4s) \tag{13}$$

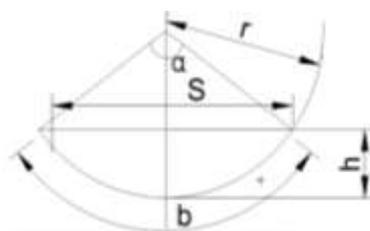


Figura 5. Características de sección circular

Tabla 1. Datos obtenidos de las pruebas de presas

BRECHA	A	b	h	s	$\hat{\alpha}$	α	r	p	a	Ar	T1	T2	G
C1	311.58	39.30	7.65	29.50	1.91	109.65	18.04	5.10	13.30	100	39	36.80	90
C2	329.29	38.00	6.60	29.50	1.68	96.43	19.78	7.10	6.92	60	78	28.15	90
C3	325.07	37.00	6.80	29.50	1.73	99.00	19.40	6.60	11.74	70	60	28.33	90
C4	314.87	35.00	7.40	29.50	1.86	106.57	18.40	6.40	10.40	64	60	25.76	90
C5	595.84	46.00	6.42	37.00	1.34	76.55	29.86	5.80	17.37	71	70	26.00	90
C6	585.13	49.00	5.30	35.00	1.18	67.40	31.54	5.50	35.00	81	50	26.83	90
C7	497.93	45.00	6.80	35.00	1.48	84.94	25.92	8.40	26.00	62	60	27.66	90
C8	104.94	19.40	4.22	17.00	1.84	105.61	10.67	7.32	3.00	32	70	25.76	90

A es el área del segmento circulares (cm^2)
 b es la longitud del arco (cm)
 h es el ancho del Arco (cm)
 s es el largo de la apertura del segmento circular (cm)
 $\hat{\alpha}$ es el ángulo del segmento del círculo (rad)
 α es el ángulo del segmento del círculo en grados
 r es el radio del círculo (cm)

p es la profundidad (cm)
 a es el ancho de la apertura (cm)
 Ar es el arrastre de los sedimentos (cm)
 $T1$ es el tirante aguas arriba (mm)
 $T2$ es el tirante aguas abajo (mm)
 G es el gasto (m^3/s)

3.4 Método de Ward

Como lo indica el autor del método, los conglomerados deben asumirse de tal manera que, al agruparse, la merma de información resultante de la fusión sea mínima, ponderando los datos obtenidos como la suma de las distancias al cuadrado de cada elemento respecto al centroide del conglomerado que pertenece. A continuación, se calculan las distancias euclidianas al cuadrado entre cada elemento, y los centroides de todos los conglomerados. Por último, se suman las distancias proporcionadas a todos los elementos. Para verificar el cálculo se genera la gráfica de Dendograma, que permite visualizar las

relaciones entre los múltiples datos, para lo cual se sabe que, en todo análisis multifactorial, se desaprovecha algo de información durante el agrupamiento, pero se logra resumir una gran cantidad de información. Durante el proceso se tiene en cuenta el uso de todas las variables, con excepción del área, debido que genera una afectación a la visualización de la gráfica y a la vez no es tan relevante en comparación a las otras variables obtenidas (figura 6-2). Además, se planteó el dendograma de los casos (obras hidráulicas) para comparar las obras que tuvieron ciertas similitudes indicado en la figura 6-1.

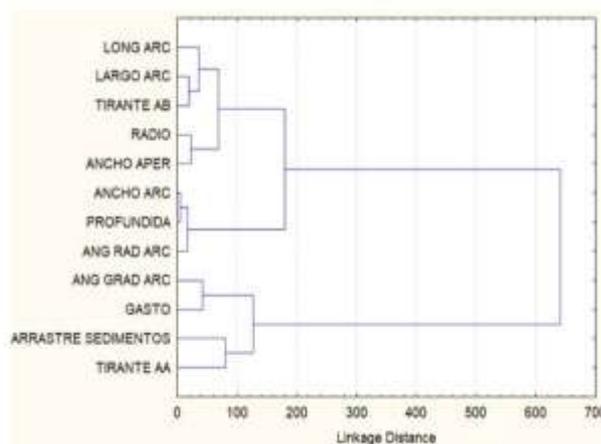
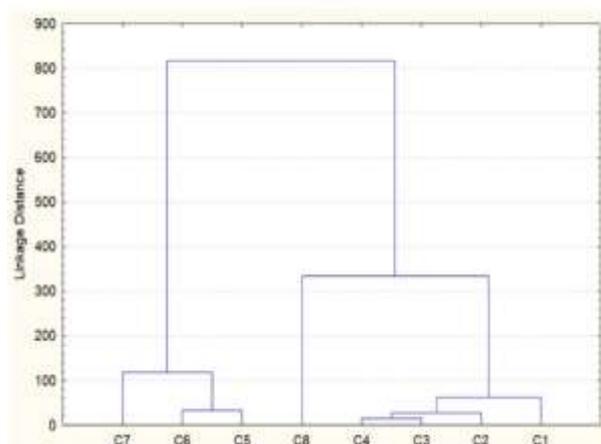


Figura 6. 1) Dendograma de obras durante el proceso experimental, 2) Dendograma de Variables obtenidos durante el proceso experimental

3.5 Análisis clúster de los modelos

Una vez realizado cada uno de los modelos y analizado los dendogramas obtenidos mediante software, si bien no se contemplaron todas las variables posibles de los casos, se puede denotar que unos poseen una interacción, que se presenta a continuación: El tirante aguas abajo junto con el largo del arco son las causales de la longitud de arco, por ende, entre menor sea el tirante, mayor es la

posibilidad de que la longitud del arco se reduzca. Como se expresó en las fórmulas, el ancho de la apertura va en conjunto con el radio. Consecuentemente, un factor que se debe de reducir a priori son éstos, debido que mientras mayor sea la apertura, mayor será el tirante aguas abajo, provocando mayores inundaciones. El ancho de arco determina la profundidad, lo que da a entender que sea cual sea el ancho de la apertura, el largo y la

longitud de arco no son muy influyentes, aunque en conjunto aportan valor al daño que se pueda presentar durante la catástrofe. Además, el tirante aguas arriba

y el gasto, rigen el arrastre del material e incluso ambos son la base de que todas las anteriores variables actúen.



Figura 7. a) Resultados con Elemento de Control (Caso 1), b) Resultados con el caso 4, c) Resultados con el caso 5

En el caso del segundo dendograma, permite conocer las similitudes entre los casos (obras hidráulicas) contemplando todas las variables, pero la importancia esta de grafica se aprecia en el caso 8, el único que no se asemeja a los demás casos; reflejando que sus características tienden a ser muy diferentes, debido a que presentó peculiaridades que redujeron el efecto de la ruptura, aminorando los daños, principalmente del arrastre y la apertura de la brecha. Aunque se mantuviera el gasto y los tirantes muy semejantes, lo que en premisas da como una conclusión positiva. No obstante, se debe analizar por medio de jerarquización de casos.

3.6 Jerarquización de datos

Dado a que el dendograma solo otorga las similitudes entre las variables y los casos, para determinar la

importancia entre cada una de las obras hidráulicas, se realizó un análisis de componentes principales y clasificación (figura 8). Con esto se determina, con mayor certeza, la obra que concede los mejores resultados en la reducción de daños y amortiguación en la apertura de la brecha, teniendo en cuenta de que cada uno de los casos tenían las mismas condiciones (forma de apertura y gasto). Para comprender el resultado se debe exponer la Figura 8, donde los casos son marcados en un plano cartesiano, los cuales se encuentran dispersos, dependiendo de las características que se obtuvieron en las pruebas (apertura brecha, Profundidad, tirantes, largo y longitud de arco, entre otros factores), considerando la mejor entre todas cuando se encuentre más alejado del punto (0,0) en ambos ejes.

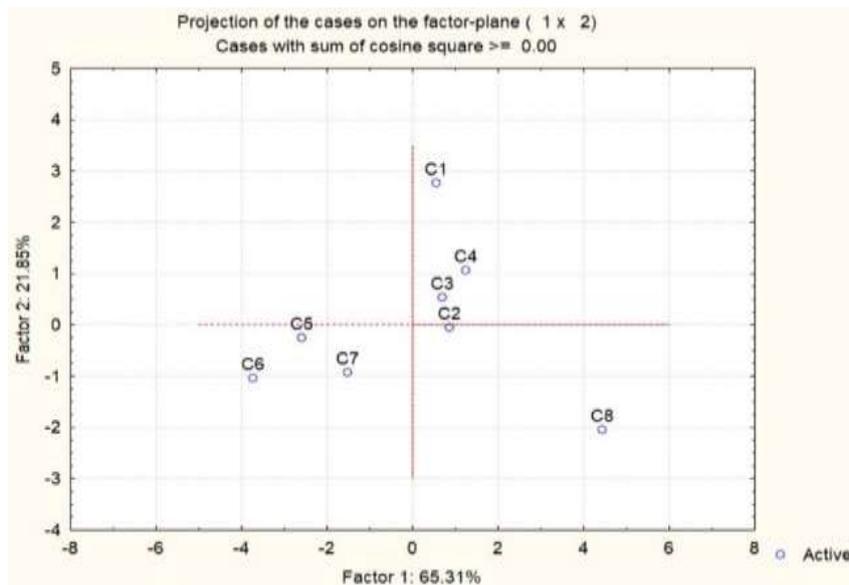


Figura 8. Jerarquización de los casos obtenidos

3.7 Comparación entre los distintos casos de presas.

Dado que la representación del elemento de control fue demostrado al momento de la calibración del modelo físico (Sánchez Quijano et al., 2018), se

presentan los resultados obtenidos con las obras de los casos 4 y 5 colocadas aguas arriba, para su comparación.

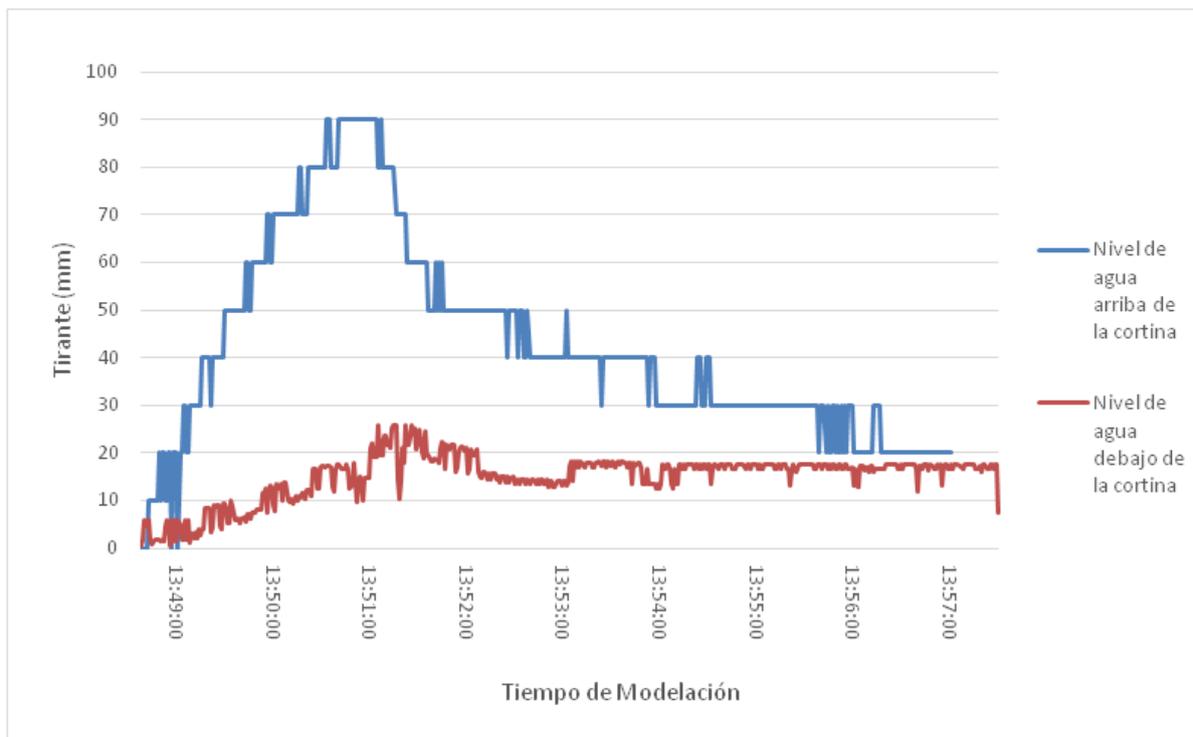


Figura 9. Tirantes obtenidos mediante prueba experimental (caso 4)

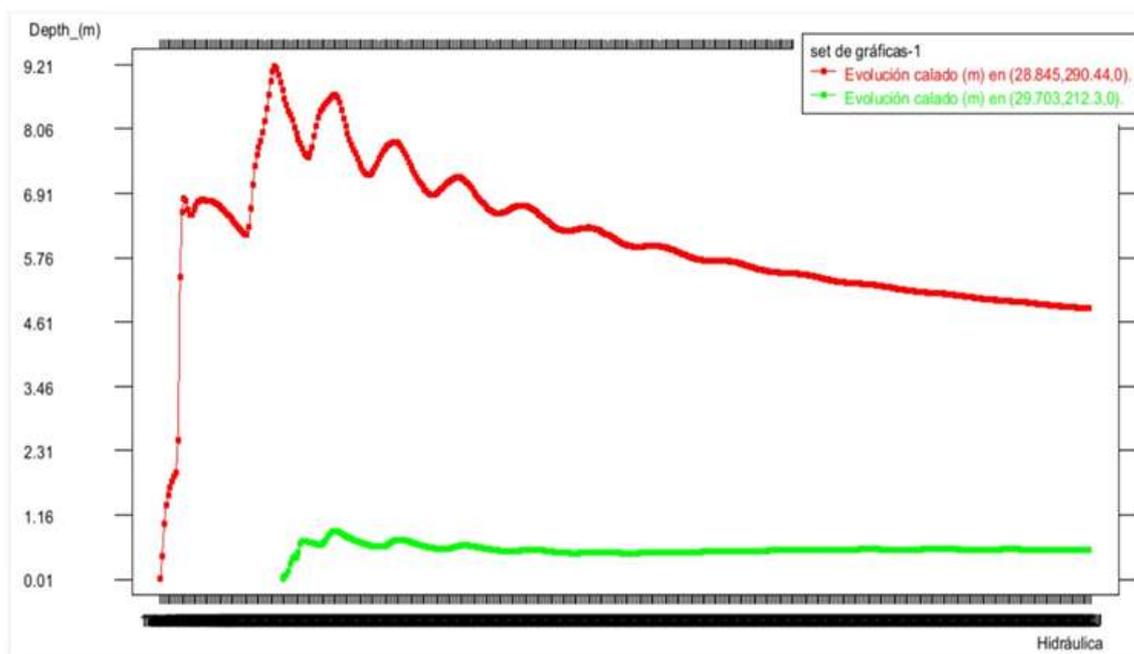


Figura 12. Tirantes obtenidos mediante modelación computacional (caso 5)

4. Discusión

Para determinar si las obras son fundamentales en la reducción de la apertura de la brecha se realizaron múltiples estudios, y si bien en la mayoría de los casos no hubo un efecto significativo que pudiera dar la pauta para establecer una reducción de daños. Se pueden apreciar teniendo en cuenta la observación del fenómeno por sí solo, algunas obras tienden a proveer un beneficio a favor de la reducción del peligro de ruptura. La distancia euclidiana generada con los casos en la jerarquización de datos visto en la Figura 8, permite conocer la semejanza o diferencia del comportamiento del modelo; El manejo de un plano cartesiano con las múltiples obras hidráulicas utilizadas que tienen la denominación de C# dan como resultado que, si reconocemos a C1 como el elemento de control, las pruebas C5, C6, C7 y C8 se encuentran alejados y las pruebas C2, C3, C4 cercanos de este y por consecuencia tienden a tener una disimilitud y aproximación en el comportamiento respectivamente, lo que permite dar un primer acercamiento a las posibles obras que tienen un fenómeno distinto. Sin embargo, es necesario tener otros parámetros para apreciar con más claridad la diferencia de la conducta del desastre. Si se ve del lado de la modelación experimental, algunos casos aparentan ser el de menor afectación en todos los

sentidos, lo que da inicio al debate de la confiabilidad del software y el modelo numérico, puesto que la modelación experimental tiene criterios que afectan al comportamiento, como la filtración debido a la baja compactación que posee el material granular, una situación que el modelaje pasa por alto. A manera de ejemplo, los casos C4 y C5 representados en las figuras 9 y 11 en su modelo experimental con ARDUINO se demuestra que la diferencia de tiempo por el cual se retiene el embalse (tirantes aguas arriba), el proceso de la apertura y la estabilidad de los tirantes aguas abajo es de valor de un minuto del modelo del C5 con respecto al C4, al trasladarlo al fenómeno escalado puede significar un lapso mayor, que ayudará a poseer beneficio a la hora de generar evacuaciones o sistemas de alerta. En los modelos numéricos representados en las figuras 10 y 12 realizados con el Software IBER son las representaciones escaladas del fenómeno, por lo que sus dimensiones están establecidos a metros. Sin embargo, las figuras no representan un cambio significativo como se pudo apreciar en el modelo experimental, se puede deber que a diferencia del experimental existen parámetros que no se pueden tomar en cuenta, como en el caso del arrastre de sedimentos. Entonces se justifica que es posible usar la obra para prevenir dichos problemas, aunque es

necesario un análisis económico, para comparar el desempeño, el beneficio y el costo, situación que no fue planteada en esta investigación, pero abre las puertas para futuros proyectos y así mejorar lo ya estudiando.

4.1 Recomendaciones

Con el fin de prevenir catástrofes, es recomendable que programas, como la International Flood Initiative (IFI), desarrollen un sistema de vigilancia y desastre en la región de América latina, como ya se tiene presente en Cuba, donde en primer lugar la inspección y mantenimiento periódicos de las presas son de gran ayuda; estos procesos también se tomarían en cuenta cada vez que ocurre un fenómeno meteorológico, hidrológico o geológico significativos. Como norma, al menos cada cinco años, se actualizará del peligro de inundaciones aguas abajo, como parte de la obligatoriedad en el país de mantener actualizados los estudios de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo (PVR). Lo anterior debe de estar vinculado al sistema nacional de vigilancia y alerta temprana de peligros climáticos, meteorológicos, hidrológicos y oceanográficos.

5. Conclusiones

La respuesta a la reducción del fenómeno por medio de obras hidráulicas en la sección del embalse (nivel aguas arriba) de la presa, se consideró como probable. Debido a que se obtuvo una reducción en la brecha. Sin embargo, por haber tenido mayores tirantes y considerando las limitaciones de la modelación, no se puede considerar que sea ésta la opción más confiable. Un análisis económico de costo-beneficio puede ser determinante en la evaluación positiva o negativa de estos resultados. Por ello, se hace hincapié en la necesidad de una evaluación económica. También se obtuvieron resultados opuestos, con obras auxiliares perjudiciales para la cortina, este es el caso 5 (Figura 11) y obras beneficiosas, como el caso 4 (Figura 9). Esta investigación queda abierta para continuar trabajando y encontrar una combinación de obras, para reducir efectos negativos en las presas, y en todos sus elementos y evitar su rompimiento o aminorar los daños que existan aguas arriba y debajo de la cortina.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del XXVIII Verano de la Investigación Científica 2018 y del XXIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2018. Por ello, los autores agradecen a la Academia Mexicana de Ciencias y al Programa Delfin, respectivamente.

REFERENCIAS

- Arreguín-Cortés, F. I. (2013). Inventario Nacional de Presas y Embalses. *Tecnología y ciencias del agua*, IV(4), 179–185. <https://doi.org/978-99954-774-3-1>
- Aureli, F., Dazzi, S., Maranzoni, A., Mignosa, P., & Vacondio, R. (2015). Experimental and numerical evaluation of the force due to the impact of a dam-break wave on a structure. *Advances in Water Resources*, 76, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.009>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, Ernest. (2009). Simulación de la ruptura de la cortina de la presa La Parota, Guerrero, México, usando un algoritmo de alta resolución. *Ingeniería hidráulica en México*, XXIV(3), 101–106.
- Chen, X., Cui, P., You, Y., Cheng, Z., Khan, A., Ye, C., & Zhang, S. (2017). Dam-break risk analysis of the Attabad landslide dam in Pakistan and emergency countermeasures. *Landslides*, 14(2), 675–683. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0721-7>

- Francisco, C. D. (2013). Modelado empírico simple del rompimiento de presas pequeñas de tierra. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, número 3, 377–388.
- González Y; O. Guedes; S. Rodríguez (2017). Monografía Las fallas en presas de tierra, Caso de Estudio: falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje. 132 pag. ISBN 978-959-261-533-2. La Habana. Cuba.
- Gunawan, P. H. (2013). Numerical method for Saint-Venant equations and related models.
- He, Z., Wu, T., Weng, H., Hu, P., & Wu, G. (2017). Numerical simulation of dam-break flow and bed change considering the vegetation effects. *International Journal of Sediment Research*, 32(1), 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.04.004>
- Hervouet, J. M. (2000). A high resolution 2-D dam-break model using parallelization. *Hydrological Processes*, 14(13), 2211–2230. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200009\)14:13<2211::AID-HYP24>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200009)14:13<2211::AID-HYP24>3.0.CO;2-8)
- Hooshyaripor, F., Tahershamsi, A., & Razi, S. (2017). Dam break flood wave under different reservoir's capacities and lengths. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 42(9), 1557–1569. <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0693-x>
- Islam, M. S., & Tsujimoto, T. (2012). Comparisons of levee breach and successive disasters in floodplain between Bangladesh and Japan. *Procedia Engineering*, 28(2011), 860–865. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.824>
- Marsooli, R., & Wu, W. (2014). 3-D finite-volume model of dam-break flow over uneven beds based on VOF method. *Advances in Water Resources*, 70, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.020>
- Matakiev, D (1973). Formas de las avenidas en Cuba. Edit. Organismos. Instituto de Hidroeconomía. La Habana, Cuba.
- Molina, S; O. Alvarez y Y. González (2016). Análisis y solución de la patología en presas de Cuba: Estado del arte. 16 pag. <https://www.researchgate.net/publication/317295636>
- Pozo, D., Salazar, F., & Toledo, M. A. (2014). Modelación del funcionamiento hidráulico de los dispositivos de aireación de desagües de fondo de presas mediante el método de partículas y elementos finitos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 30(1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.11.002>
- Sánchez Quijano, M. A., Miguel González, C., & Gutierrez-Lopéz, A. (2018). Modelación hidrológica de la rotura de presa utilizando el software IBER. *Revista NTHE*, 24 (ISSN: 2007-9079), 34–40.
- Secretaria de Economía. (2015). NORMA MEXICANA NMX-AA-175-SCFI-2015 DE RIESGO Y CLASIFICACIÓN DE PRESAS.
- Secretaría de Servicios Parlamentarios. (2013). LEY GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL (pp. 1–15).
- USACE. (2008). Hydrologic Modeling System Applications Guide. March.
- Valiani, A., Caleffi, V., & Zanni, A. (2002). Case Study: Malpasset Dam-Break Simulation using a Two-Dimensional Finite Volume Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 460–472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:5\(460\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(460))
- Wang, L. H., & Pan, C. H. (2015). An analysis of dam-break flow on slope. *Journal of Hydrodynamics*, 26(6), 902–911. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60099-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60099-8)
- Wu, W., & Wang, S. (2007). One-Dimensional Modeling of Dam-Break Flow over Movable Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 48–58. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(48\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(48))
- Xia, J., Lin, B., Falconer, R. A., & Wang, G. (2010). Modelling dam-break flows over mobile beds using a 2D coupled approach. *Advances in Water Resources*, 33(2), 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.11.004>

Xue, Y., Xu, W. L., Luo, S. J., Chen, H. Y., Li, N. W., & Xu, L. J. (2011). Experimental study of dam-break flow in cascade reservoirs with steep bottom slope. *Journal of Hydrodynamics*, 23(4), 491–497. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60140-0](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60140-0)

Como citar este artículo:

Sánchez Quijano et al., (2020). Alternativas de obras hidráulicas para reducir el tiempo de formación de una brecha de ruptura en cortina de la presas. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 1-14. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental
para América Latina y el Caribe

Aprovechamiento de los sedimentos de los embalses como nutrientes para la fertilización de suelos agrícolas en la República Dominicana

Use of reservoir sediments as nutrients for the fertilization of agricultural soils in the Dominican Republic

Bernardo Segura L^{1*}, Rita María Ferreira da Fonseca²

Recibido: 16/10/2019

Aceptado: 15/02/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

El proyecto de investigación “Aprovechamiento de los Sedimentos de Embalses como Nutrientes para la Fertilización de Suelos Agrícolas en la República Dominicana”, proyecto financiado por FONDOCYT-convocatoria 2015 y consorciado con la Universidad de Évora, Portugal; se abordó la problemática de la erosión en las cuencas hidrográficas y la sedimentación en los embalses Sabana Yegua ubicada en la región sur de la República Dominicana y Tavera en la región norte, con la finalidad de determinar la calidad nutricional de los sedimentos almacenados en los embalses, para utilizarlos como enmiendas mejoradoras de suelos en áreas degradadas de las cuencas, y de esta manera procurar una mayor capacidad de almacenamiento de agua en los embalses y mejorar su calidad, con el propósito de garantizar la generación de hidroelectricidad y abastecer la demanda de riego de los productores agrícolas. Este proyecto se inició en septiembre del 2016 y finalizó en agosto 2019. El método para realizar la investigación consistió en hacer muestreos de los suelos en las cuencas hidrográficas, los sedimentos dentro de los embalses, así como en el agua y determinar los elementos orgánicos e inorgánicos y los metales pesados. De esta manera evaluar la riqueza nutricional de los sedimentos de los embalses y los suelos de las cuencas, así como la calidad del agua, a través de análisis de laboratorio y ensayos agrícolas. Los resultados de los análisis mostraron que los sedimentos de los embalses tienen una mayor riqueza nutricional que los suelos de las cuencas. El agua resultó de buena calidad para el uso agrícola. Las conclusiones confirman los beneficios medioambientales de la utilización de los sedimentos como enmiendas agrícolas. Sin embargo, el análisis económico revela que la utilización de estos sedimentos como fertilizantes lo hace no rentable para los productores, debido a los altos costos de la extracción, desecación, transporte y aplicación a nivel parcelario. Sin embargo, se recomienda que se hagan otros estudios en nuevas zonas agroclimática y con otros cultivos más rentables para evaluar la rentabilidad.

Palabras clave: Embalse, sedimentación, erosión, fertilización

Abstract

The research project “Use of the Sediments of Reservoirs as Nutrients for the Fertilization of Agricultural Soils in the Dominican Republic”, supported by FONDOCYT-call 2015 and consorted with the University of Évora, Portugal. The problem of erosion in watersheds and sedimentation in Sabana Yegua reservoirs located in the southern region of the Dominican Republic and Tavera in the northern region is addressed, in order to determine the nutritional quality of sediments stored in reservoirs, to use them as soil improvement amendments in degraded areas of the basins, and thus ensure greater water storage capacity in reservoirs and improve their quality, with the purpose of ensuring hydroelectricity generation and supplying irrigation demand of agricultural producers. This project began in September 2016 and ended in August 2019. The method to carry out the research consisted of sampling the soils in the hydrographic basins, the sediments inside the reservoirs, as well as in the water and determining the organic elements and inorganic and heavy metals. In this way evaluate the nutritional richness of the sediments of the reservoirs and the soils of the basins, as well as the quality of the water, through laboratory analysis and agricultural tests. The results of the analysis showed that reservoir sediments have a higher nutritional richness than basin soils. The water was of good quality for agricultural use. The conclusions confirm the environmental benefits of using sediments as agricultural amendments. However, the economic analysis reveals that the use of these sediments as fertilizers makes it unprofitable for the producers, due to the high costs of extraction, desiccation, transport and application at the plot level. However, it is recommended that other studies be done in new agroclimatic areas and with other more profitable crops to assess profitability.

Keywords: Reservoir, sedimentation, erosion, fertilization.

1 Gestión sostenible de los Recursos Hídricos en los Estado Insulares del Caribe, CEHICA-INDRHI, Av. Juan de Dios Ventura Simó esq. Av. Jiménez Moya, Sto. Dgo., Rep. Dom. Apartado 1407 bernardosegura3@gmail.com

2 University of Évora, Portugal. Escuela de Ciencia y Tecnología, ICT. Instituto de Ciencia de la Tierra, Ambitierra Laboratorio de Biogeoquímica Ambiental. rfonseca@uevora.pt

1. INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología de la República Dominicana realiza convocatorias anuales a través del Fondo Nacional de Innovación y Desarrollo Científico-Tecnológico (FONDOCYT), del Vice ministerio de Ciencia y Tecnología.

En la convocatoria FONDOCYT-2015, el Instituto Nacional de Recursos hidráulicos, (INDRHI), a través del Centro para la Gestión Sostenible de los Recursos hídricos en los Estados Insulares del Caribe (CEHICA), conjuntamente con la Universidad de Évora Portugal, (UEVORA), formularon el proyecto de investigación Aprovechamiento de los Sedimentos de los Embalses como Nutrientes para la Fertilización de Suelos Agrícolas en la República Dominicana, esta investigación se hizo con la finalidad de evaluar la riqueza nutricional de los sedimentos de los embalses y así aprovechar esos nutrientes para fertilizar los suelos degradados en las cuencas hidrográficas de la República Dominicana.

El proyecto aborda el problema de la sedimentación excesiva en los embalses de Sabana Yegua y Tavera, así como el deterioro de la calidad del agua, agravado por periodos de intensas lluvias que periódicamente se presentan, convirtiendo estos sedimentos en un recurso natural renovable, a través de su extracción, clasificación y uso como fertilizante alternativo a los suelos agrícolas de las cuencas.

La República Dominicana tiene serios problemas con la sedimentación excesiva en los embalses, por la acción de la erosión en sus cuencas de drenaje, algunas en zonas montañosas con pendientes pronunciadas y con baja cobertura del suelo, realizadas por periodos de ciclones que se producen casi todos los años. Debido al origen volcánico de la isla Española, dominada por rocas basálticas, cenizas, brechas volcánicas, rocas volcánicas de distintas naturalezas químicas y piedra caliza, los materiales preferentemente lixiviados de los suelos son de dimensión fina, ricos en nutrientes y minerales de arcilla con alta capacidad de retención de iones. Estas partículas finas que retienen fácilmente los nutrientes minerales y orgánicos son transportadas y depositadas en los embalses, causando grandes problemas de sedimentación y disminución de la calidad del agua, en algunos embalses presentando síntomas de eutrofización.

El proyecto se llevó a cabo en los embalses de Sabana Yegua, localizado en la vertiente Sur de la cordillera central en la provincia de Azua de Compostela y en Tavera en la vertiente Norte de la misma cordillera. Estos embalses, no solo suministran agua de riego para cientos de hectáreas para el desarrollo agrícola, si no también sirven de generación hidroeléctrica y control de inundaciones.

El proyecto se inició en septiembre del 2016 hasta agosto del 2019, abarcando un período de ejecución de 36 meses, con un aporte del FONDOCYT de RD\$8,330,190.00 y un aporte de contrapartida del INDRHI de RD\$2,844,000.00 para un total de RD\$11,174,190.00 pesos.

El objetivo general del proyecto fue aprovechar los sedimentos almacenados en el fondo de los embalses para utilizarlo como enmiendas mejoradoras de suelos degradados y así aumentar su productividad y lograr una mayor capacidad de almacenamiento y calidad de agua. Los objetivos específicos fueron:

1. Estudiar la geoquímica, la física y la mineralogía de los sedimentos de los embalses seleccionados y su relación con la calidad del agua, para determinar su viabilidad en el uso agrícola y comprender el funcionamiento biogeo-químico de los mismos.
2. Determinar la dinámica de los procesos erosivos en la sedimentación de los embalses.
3. Definir estrategias de gestión adecuada para la recuperación y rehabilitación de embalses, para minimizar sus impactos ambientales y mejorar la calidad de los suelos empobrecidos de las cuencas.
4. Realizar ensayos agrícolas de fertilidad a escala piloto, con varias especies de plantas en diversos tipos de sedimentos, mezclados en diversas proporciones con suelo común de la región y comparar con el desarrollo de las plantas, y
5. Evaluar la viabilidad económica del proceso a gran escala, incluyendo la extracción, transporte y depósito de los sedimentos en los sitios seleccionados para su uso agrícola. En el país no se tenía ninguna experiencia relacionada al uso de los sedimentos como enmienda de fertilización en cultivos agrícolas, sin embargo en otros países como

Brasil, Norte de África y Portugal ya se habían hecho investigaciones y logrado buenos resultados.

2. METODOLOGÍA

2.1 Encuadramiento geológico

Los embalses de Tavera y Sabana Yegua son separados por la cordillera central de la isla, situándose Tavera al Norte, en una región más accidentada y pluviosa, y Sabana Yegua al sur, en una región más cálida y seca. Las cuencas de drenaje de Sabana Yegua y Tavera se caracterizan por la presencia de rocas Vulcano-sedimentarias de origen en arco-isla, tonalitas, areniscas, conglomerados y rocas volcánicas intermedias (figura 1). La principal diferencia entre la geología de las dos cuencas es que toda el área de Sabana Yegua y una parte de sus afluentes, encajan en formaciones sedimentarias, detríticas y carbonatadas.

Para el componente calidad de agua, dentro de los embalses, se realizaron mediciones in-situ y se

tomaron muestras de agua en un perfil vertical, en superficie, medio y en el fondo para análisis físico-químicos, microbiológicos, materia orgánica y metales pesados. Las muestras fueron almacenadas en neveras a 4 °C y trasladadas al laboratorio para su análisis posterior dentro del tiempo máximo de almacenaje recomendado en el STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 2005. Estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio calidad de agua del CEHICA, centro UNESCO categoría 2. La figura 2 muestra trabajos de campo.

Las mediciones de los parámetros In-situ fueron: Temperatura, oxígeno disuelto, pH, redox y Conductividad Eléctrica, entre otros. También se analizaron los parámetros organolépticos, los iones mayoritarios (calcio, magnesio, sodio, cloruro, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, nitratos, nitritos, amonio), bacteriológicos (coliformes totales, coliformes fecales, pseudomonas) materia orgánica (demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, aceites y grasas) y metales pesados (cobre, zinc, hierro y plomo).

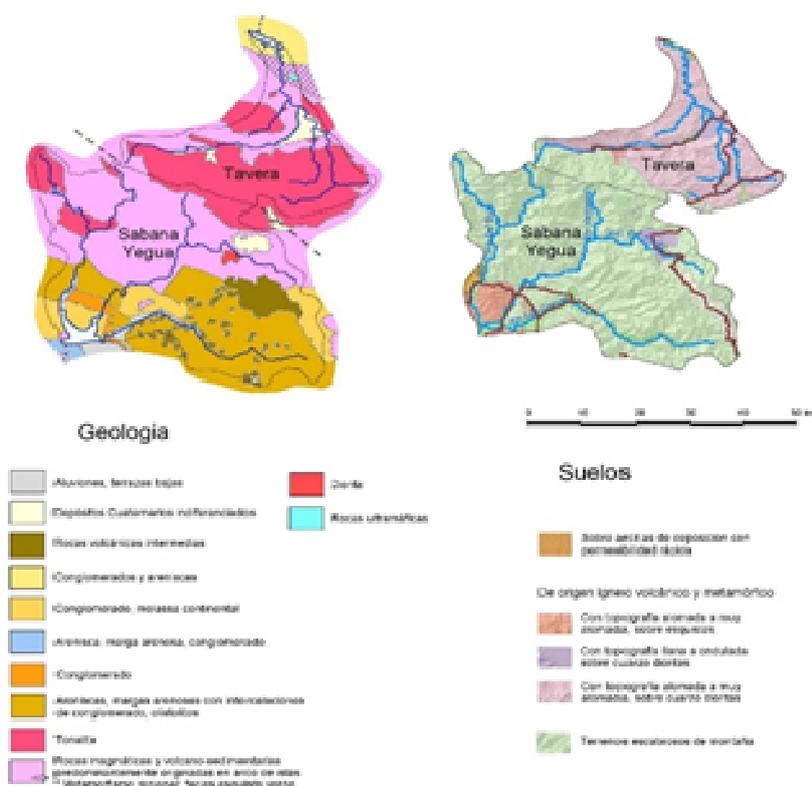


Figura 1. Encuadramiento geológico de las cuencas de las represas de Tavera y Sabana Yegua



Figura 2. Extracción de los sedimentos del fondo de los embalses

2.2 Muestreo de los suelos de las cuencas

Para el muestreo de los suelos, que representan la fuente más directa de los sedimentos depositados en los embalses, las cuencas fueron divididas en sectores, según las litologías dominantes.

La cuenca de Sabana Yegua fue dividida en cinco sectores con un total de diez puntos que fueron seleccionados con el fin de representar las 3 sub-cuencas en que se divide esta cuenca, que son: río Yaque del Sur, río Grande o del Medio y río Las Cuevas, acorde a las distintas litologías (figura 3). Estos sectores son: 1) Sector de la Tonalita, Presa de Palomino, (Yaque del sur); El Cercado Maldonado, (río Grande). 2) Sector de rocas magmáticas volcano-

sedimentarias predominantemente originadas en arco de islas, Los Fríos, Las Cañitas, El Castillo y Valle Nuevo-Constanza, (río Grande). 3) Sector frontera entre las rocas volcano-sedimentarias y las rocas Sedimentarias, Guayuyal, (Yaque del sur). 4) Sector de Terrazas (Conglomerados, arenas, molassa continental, caliza detrítica, etc.). Loma del Yaque, (Yaque del sur). Y 5) Sector de rocas Carbonatadas: calizas, calizas detríticas, areniscas calcáreas, margas, Los Indios, Padre Las Casas (con intrusiones de tonalita), (río Las Cuevas); El Naranjito Guayabal (con intrusiones de tonalita), (río Las Cuevas); Valle Nuevo, Constanza (con conglomerados y arenas continentales cercanas de las rocas volcano-sedimentarias del tipo arco), (río Las Cuevas).

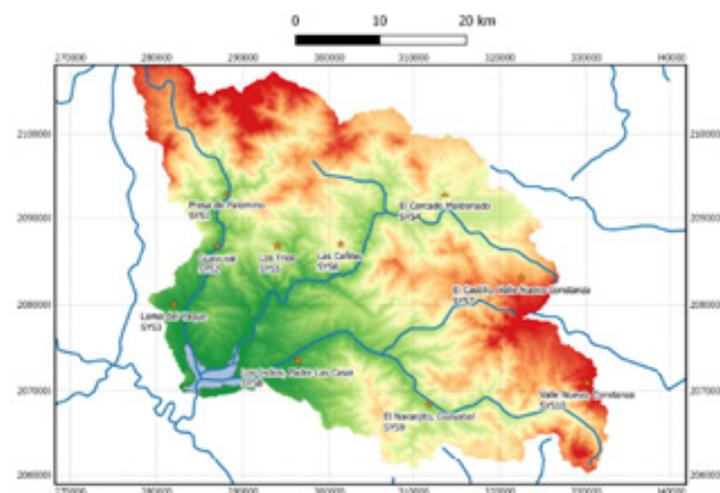


Figura 3. Puntos de muestreo de suelos representativos de las distintas litologías de la Cuenca de Sabana Yegua

En la cuenca de Tavera fueron escogidos los 8 puntos más representativos de la litología de la cuenca y el muestreo fue dividido en 5 sectores, de acuerdo con las rocas dominantes (figura 4). Los sectores son: 1) Sector de conglomerados, areniscas, calizas arrecifales, turbiditas. Tavera, El Caimito. 2) Sector de rocas magmáticas volcano-sedimentarias

predominantemente originadas en arco de islas, La Guama, Piedra Blanca, La Estacinta, Jarabacoa. 3) Sector de Tonalitas, El Corocito, Paso Bajito, Jimenoa. 4) Sector de contacto entre Tonalitas y rocas magmáticas volcano-sedimentarias, El Dulce. Y 5) Sector de Tonalitas a Oeste, Los Tablones y La Descubierta.

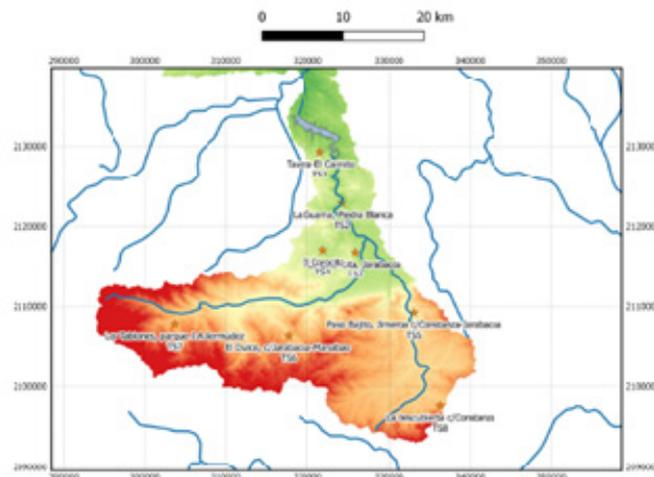


Figura 4. Puntos de muestreo de suelos representativos de las distintas litologías de la Cuenca de Tavera

2.3 Muestreo de sedimentos en los embalses

En los embalses, se eligieron los puntos de muestreo teniendo en cuenta toda la extensión del lago y las aportaciones de los principales afluentes. Fueron seleccionadas zonas de diferentes profundidades, incluyendo las zonas más profundas correspondientes al antiguo cauce del río principal y zonas menos

profundas, situadas cerca de las orillas (figuras 5 y 6). Se trató de obtener de este modo la máxima información sobre la distribución de los sedimentos en los embalses, desde la desembocadura de los afluentes a las zonas más remotas a lo largo de la pared de la presa. Todos los puntos fueron georeferenciado con GPS.



Figura 5. Distribución de los puntos de muestreo de los sedimentos en el embalse de Sabana Yegua

El muestreo de los sedimentos se realizó en un bote utilizando una draga tipo Shipeck, lo que permitió una toma de la capa superficial del material depositado de 10 a 15 cm. Este muestreo, siempre controlado por la medición de la profundidad permite, después del análisis de las muestras hacer una caracterización preliminar de los sedimentos depositados y un mapeo del fondo de los embalses, teniendo en cuenta la batimetría.

Cada muestra se dividió en tres sub-muestras; una para los análisis granulométricos, mineralógicos y para la determinación de la geoquímica total. Se colocó en funda de plástico y se dejó a la temperatura ambiente. Las otras dos fueron destinadas al análisis de metales y nutrientes, se colocaron en recipiente de plástico cerrado en medio refrigerado con la ayuda de refrigerador-res y acumuladores en la embarcación y en el laboratorio en refrigeradores.

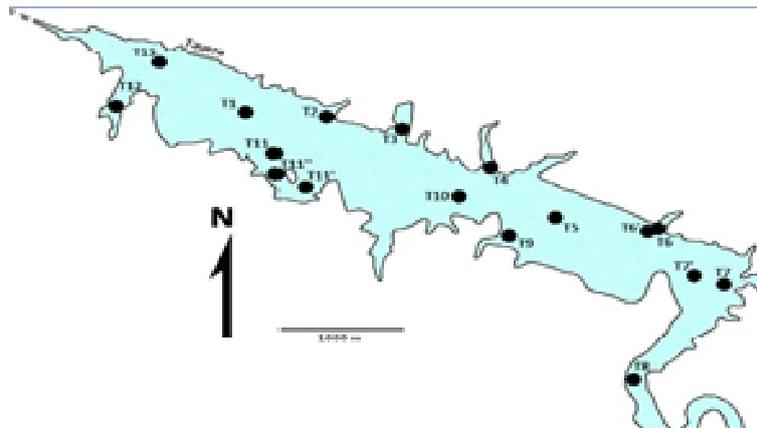


Figura 6. Distribución de los puntos de muestreo de los sedimentos en el embalse de Tavera

2.4 Análisis textural de los suelos y sedimentos

Las etapas de preparación de las muestras de sedimento para el análisis de textura fueron las siguientes: i) destrucción de la materia orgánica con peróxido de hidrógeno progresivamente más concentrado, durante 2-3 semanas, ii) secado en baño de arena y cribado con tamiz de 2 mm para separación de los elementos más gruesos y iii) separación de la fracción arenosa por cribado en húmedo.

Las fracciones retenidas en los tamices fueron secadas y pesadas, correspondiendo a las fracciones grava (> 2 mm) y arena (entre 2 mm y 63 μ m). La fracción más fina se procedió a la separación por pipeteado mediante la utilización de una Pipeta de Andersen después de la desfloculación de la suspensión con hexame-tafosfato de sodio 0,1M.

Después de agitación y al cabo de períodos de tiempo correspondientes a la velocidad de caída de las partículas según la ley de Stokes, las distintas fracciones muestreadas fueron secadas a 105 ° C y posteriormente pesadas. La clasificación de los materiales sedimentarios se hizo sobre la base de la

proyección de los porcentajes de cada fracción granulométrica (arena-limo-arcilla) en un diagrama triangular de Shepard, tal como se representa en la figura 7.

2.5 Análisis Geoquímico de Suelos y Sedimentos

Para una mejor representatividad analítica todos los ensayos químicos se realizaron con 3 réplicas de cada muestra (suelos y sedimentos), siendo presentados para cada muestra y para cada parámetro, el valor promedio. Para un mayor rigor analítico, en todas las soluciones químicas y diluciones de las muestras, se utilizó agua Milli Q de calidad ultra pura y todos los reactivos tienen cualidad pro análisis o pura (Ex: ácidos HNO₃, HCL y HF).

Todos los análisis químicos en los suelos se realizaron en la fracción inferior a 2 mm, y esta fracción se obtuvo mediante cribado por tamiz de malla 2 mm. Esta separación se efectúa teniendo en cuenta que la fracción más gruesa del suelo se compone mayoritariamente de granos de cuarzo y fragmentos líticos, desprovistos de cualquier actividad química.

2.6 Análisis del fósforo total en forma de fosfato

La fracción total de fósforo se estima a partir de la cantidad de fósforo extraída con H₂SO₄ 1N en una muestra quemada a 550°C, para convertir todas las formas orgánicas de este elemento en formas inorgánicas, de más fácil cuantificación. La determinación del fósforo se realizó por espectroscopia de absorción molecular UV/visible por el método del ácido ascórbico molibdato de amonio.

i. Análisis de los nutrientes en formas biodisponibles

Dada la gran importancia que desempeñan las formas disueltas o fácilmente movilizadas de los elementos (formas disponibles o asimilables), en el crecimiento y producción vegetal, en suelos y sedimentos de los embalses se determinaron sus contenidos en relación con los elementos cuya presencia es indispensable para la nutrición pero que generalmente se encuentran en deficiencia en la mayoría de los suelos. Se incluyen en este grupo, los macronutrientes principales (N, K, P, Ca y Mg) y los micronutrientes metales (Fe, Mn, Cu y Zn.). La importancia de la evaluación de estos últimos sigue siendo que encima de determinados límites los valores se consideran tóxicos.

ii. Análisis del Fósforo y Potasio Biodisponibles

El método utilizado en las muestras (método de Egner-Riehm) se basa en la extracción de las combinaciones fosfatadas y del potasio de intercambio y soluble del suelo y sedimentos, por agitación con una solución de lactato de amonio en medio acético. En el caso del fósforo, la solución actuará mediante el control del pH y de la actividad del calcio (los dos principales factores que condicionan la solubilidad y la consiguiente asimilación del fósforo); en relación al potasio actuará a través del intercambio de K⁺ adsorbido por el NH₄⁺ introducido cuando se une el reactivo. Al considerarse como fósforo y potasio "asimilables" las cantidades de aquellos nutrientes que pasan al extracto después de agitar el suelo/sedimento con la solución extractiva, se supone que esas cantidades corresponden a las que, efectivamente, las raíces de las plantas serían capaces de asimilar. La determinación del fósforo se realizó por espectroscopia de absorción molecular UV/visible por el método del ácido ascórbico molibdato de amonio, mientras que el potasio fue determinado por espectrometría de emisión óptica con plasma inducido (ICP-OES).

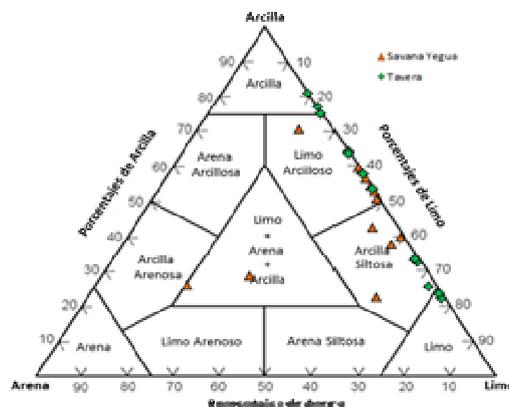


Figura 7. Proyección de los porcentajes de las principales fracciones granulométricas en un diagrama triangular de Shepard, para clasificación textural de los sedimentos de los dos embalses.

2.7 Análisis del calcio, magnesio, hierro, cobre y zinc biodisponibles

La extracción de los macro-nutrientes (Ca y Mg) y micronutrientes metales (Fe, Mn, Zn, Cu) esenciales al desarrollo de las plantas se basó en el método de Lakanen y Ervio en que las muestras son agitadas en una solución extractante de acetato de amonio y

EDTA en medio ácido con ácido acético. Todos los elementos fueron analizados por ICP-OES (Perkin-Elmer, Óptima 8300).

iii. Análisis de la fracción total de elementos mayores (Si, Al, Ti, Fe, Mg, Ca, K, Na, Mn, P) y menores (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Zn)

El análisis geoquímico de la fracción total de las muestras geológicas requiere que toda la muestra pase a la fase soluble para poder analizarla en relación a todos los principales elementos químicos. La metodología utilizada para la extracción de los elementos químicos para la fase acuosa depende de las características químicas de los elementos. Los elementos que existan incorporados en minerales refractarios sólo pasarán en su totalidad a la fase soluble si se fusionan las muestras. Por otro lado, elementos que puedan evaporarse a altas temperaturas, como es el caso de la mayoría de los elementos metálicos, As y Hg, deberán ser cuantificados en muestras digeridas con soluciones ácidas. De este modo, en las muestras de suelos y sedimentos se utilizaron dos tipos de extracción:

- Fusión a temperatura de 1000°C para análisis de elementos mayores (Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, Mn, P) y elementos existentes en minerales muy resistentes (Cr, Sn, Ba, Sr);
- Digestión con solución triácida (HCl-HNO₃-HF) - para análisis de elementos metálicos (Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Co, Ag), V, As.

2.8 Fusión de las muestras para análisis de la geoquímica total

Las muestras finamente molidas se mezclan con reactivo fundente (Spectroflux 100 B, metaborato y tetraborato de litio) para permitir la fusión de todos los minerales a temperaturas menores que 1000°C. La fusión se da en las muestras colocadas en crisoles de grafito puro, en horno a 1000°C. Después de la fusión, se obtiene una perla de material fundido que se disuelve en solución ácida nítrica, por agitación continua. Las muestras se filtran a fin de retirar las partículas de grafito y se miden a un volumen constante.

Para probar la fertilidad de los sedimentos se realizó un ensayo en tarros con mezclas de sedimento y suelo de las cuencas en diferentes proporciones, (100% suelo testigo, 25% sed-75% suelo, 50% sed-50% suelo, 75% sed-25% suelo), resultando la mezcla (25% sed-75% suelo) la más apropiada para el desarrollo del cultivo de aji gustoso. Figura 8.

2.9 Análisis Económico

El análisis económico consistió en el análisis de los siguientes aspectos, los cuales mostraron la factibilidad de la extracción de los sedimentos de las presas para ser usados como enmiendas agrícolas.

- i) Costos e inversiones asociados al proceso de extracción de sedimentos de las presas,
- ii) Costo de producción de ajíes,
- iii) Costo de producción con incorporación de sedimentos al terreno como elementos fertilizantes para la producción de ajíes,
- iv) Comparación de costos de producción de ajíes usando la incorporación de sedimentos versus fertilización convencional,
- v) Comparación de la productividad de ajíes usando la incorporación de sedimentos versus fertilización convencional,
- vi) Valoración de los beneficios asociados a la extracción del sedimento de los embalses de las presas,
- vii) Incremento del volumen del embalse,
- viii) Incremento en la capacidad de generación de energías eléctrica,
- ix) Mejora en la calidad del agua,
- x) Determinación de la rentabilidad del uso de los sedimentos como enmienda de fertilización de los suelos.



Figura 8. Cultivo de aji gustoso en mezcla de sedimento y suelo

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este artículo solo se publicaran algunos resultados más significativos, debido que se hace imposible por limitaciones de espacio exponer en detalle todos los elementos analizados y obtenido en esta investigación.

3.1. Textura de los sedimentos

Para evaluar la fertilidad de los sedimentos en los embalses, entre las propiedades físicas, la textura es

uno de los parámetros más importantes, ya que (1) determina la tasa de penetración y de retención de agua, (2) facilita la aireación, (3) ejerce una influencia directa en la fertilidad (en función del tamaño de las partículas, existe una mayor o menor capacidad de retención y de disponibilidad de nutrientes). Los datos relativos al porcentaje de las 3 principales clases dimensionales (arena, limo y arcilla) en los dos embalses, están representados en la tabla 1.

Tabla 1. Porcentajes de las 3 principales clases granulométricas de los embalses Sabana Yegua y Tavera

Embalse de Sabana Yegua			
Muestras	% Arena	% Limo	% Arcilla
Sy1	0,036	41,254	58,710
Sy2	0,052	43,727	56,221
Sy3	0,029	47,358	52,613
Sy4	3,713	58,632	37,655
Sy5	0,078	40,374	59,548
Embalse de Tavera			
T1	0,041	23,246	76,713
T2	0,261	18,982	80,757
T3	0,145	36,096	63,759
T4	0,632	67,137	32,232
T5	0,047	42,534	57,418

Para la identificación de los principales tipos sedimentarios en los dos embalses, los valores porcentuales de arena, limo y arcilla obtenidos a través del análisis granulométrico, fueron representados a través de gráficos de barras (figura 9) y proyectados en diagramas triangulares de Shepard (figura 7), lo que permitió una congruente clasificación de los sedimentos estudiados. Para una mejor comparación en relación a los materiales de origen, los datos de la granulometría de los suelos, obtenidos por el equipo del laboratorio de suelos del INDRHI. El análisis conjunto de la geología de las cuencas de drenaje y de los datos de distribución de las clases texturales de los sedimentos de fondo referentes a un período de mayor acarreado detrítico nos lleva a concluir que en cualquiera de los sistemas estudiados la naturaleza del material originario y el clima, dominado por una precipitación elevada y uniforme en la cuenca de Tavera y por condiciones más secas en Sabana yegua, son los factores preponderantes en la distribución granulométrica de los materiales. Los sedimentos distribuidos revelan una gran homogeneidad textural, reflejo de la uniformidad litológica de sus cuencas de drenaje y de

las altas tasas de precipitación anual, lo que facilita el aumento de la energía hídrica en los embalses, facilitando la mezcla y calibración de las partículas sedimentarias. La gran influencia de estos factores sobre la distribución sedimentaria es igualmente notoria en las diferencias texturales registradas entre los sedimentos de los dos embalses. Algunos sedimentos de Sabana Yegua tienen mayor componente arenosa lo que indica una mayor influencia de las rocas detríticas que afloran en las cuencas, mientras que en Tavera, los sedimentos con textura más uniforme y más fina, son predominantemente arcillosos y limosos, lo que refleja una litología fina y de mayor homogeneidad, representada por rocas vulcano-sedimentarias de origen en arco-isla, tonalitos y volcánicas intermedias, y por condiciones climáticas más lluviosas, que promueven una mayor distribución de las poblaciones grano-métricas. La distribución sedimentaria en los dos embalses resalta la importante contribución de elementos finos en el fondo de los embalses. Las clases granulométricas preponderantes son arcilla limosa y limo arcilloso que se depositan preferentemente en el antiguo lecho

de los cursos de agua principales donde se registran las mayores profundidades. Solo en Sabana Yegua, que tiene contribución de una mayor diversidad de litologías, donde se incluyen rocas vulcano-sedimentarias y volcánicas intermedias, tonalitas y rocas sedimentarias detríticas y carbonatadas, se observa un componente arenoso más importante en las zonas menos profundas (muestras SY14 – SY12 – SY10), correspondientes a las entradas de los cursos de agua de alimentación y a las zonas marginales, menos profundas. En relación con los suelos, los sedimentos tienen una textura más fina y más homogénea, lo que refleja (1) la erosión selectiva de las partículas más finas y menos densas de los suelos que son lixiviadas y transportadas al interior de los embalses y (2) la calibración ocurrida por los procesos naturales de transporte de las partículas, desde la erosión de los suelos y rocas de origen hasta su deposición. Además, los suelos analizados son muy heterogéneos por representar las distintas litologías de las cuencas de drenaje. Desde el punto de vista de la fertilidad, la dominación de los sedimentos de textura fina es extremadamente importante, ya que estos constituyen la parte químicamente más reactiva de los sistemas lacustres, al favorecer la acumulación de la materia orgánica detrítica y al presentar mayor potencial en la interacción con el agua (lo que conduce a la mayor retención de elementos nutritivos).

3.2 Geoquímica de los Suelos y Sedimentos

La composición química de los sedimentos de fondo es quizás uno de los factores más importantes en la evaluación de su capacidad en términos de nutrición vegetal. Al igual que la mayoría de los suelos, estos sedimentos constituirán la fuente de todos los nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas (con excepción del oxígeno, el hidrógeno y el carbono), la importancia de su estudio químico reside en el conocimiento de la concentración de los elementos nutritivos y de las condiciones que los hacen asimilables para las plantas. Tal conocimiento hace posible evitar la toxicidad resultante del exceso de determinados elementos.

3.2.1 Fósforo total en forma de fosfato, fósforo y potasio biodisponibles.

Se consideran macro-nutrientes principales los elementos químicos esenciales para el crecimiento y producción vegetal y que son absorbidos en mayor cantidad por las plantas. En la mayoría de los suelos no existen en cantidades suficientes, siendo necesario recurrir a su aplicación en forma de fertilizantes. En

el estudio de la evaluación de las potencialidades agrícolas de un determinado suelo, se consideran elementos prioritarios, por lo que en este trabajo se les ha atribuido mayor relevancia. Por la carencia de estos elementos en la generalidad de los suelos, en caso de que sus valores sean elevados en los sedimentos de los embalses, éstos podrán, eventualmente, ser utilizados como fertilizantes, con todas las consecuencias positivas que de ello derivan. El mejoramiento de las propiedades químicas y físicas de los suelos sujetos a procesos erosivos intensos, se basa en el suministro de aditivos que contengan cantidades apropiadas de nutrientes, pero, para evitar problemas de contaminación, estos aditivos deberán ser íntimamente relacionados con el tipo de suelo y las condiciones climáticas. Por este motivo, los fertilizantes minerales tienen todas las ventajas de los fertilizantes químicos, pero su calidad debe estar estrictamente controlada. Estos fertilizantes minerales pueden ser los sedimentos acumulados en el fondo de los embalses, si éstos han concentrado los elementos nutritivos necesarios para el desarrollo vegetal y no tienen significativas concentraciones de elementos tóxicos. Los macro-nutrientes principales son el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Desde el punto de vista de la fertilidad, el fósforo es un constituyente esencial de todas las células vivas y entra en composición con los grupos más importantes para el metabolismo de las plantas. Su acción se ejerce de forma notable en la calidad de las producciones agrícolas, influyendo en la floración, fructificación, formación de las semillas y maduración. En los embalses el fósforo retenido en los sedimentos es el elemento clave para la eutrofización, en virtud de su papel como un elemento limitante de crecimiento en la mayoría de las aguas dulces, y debido a que estos materiales sedimentarios desempeñan un papel central en el ciclo de este elemento. La mayoría de los sedimentos son susceptibles de extraer del agua grandes cantidades de ortofosfato cuando las concentraciones de este elemento aumenta y de liberarlo cuando las concentraciones en el agua disminuyen, por necesidades biológicas. En virtud de este equilibrio dinámico del fósforo entre los sedimentos y el agua, durante el período estival, cuando las fuentes externas que suministran los nutrientes son escasas o incluso nulas, la liberación del fósforo existente en los sedimentos y su disolución en la columna de agua es un importante factor para los blooms de fitoplancton normalmente comprobados en la mayoría de los embalses, que pueden reducir drásticamente las provisiones de oxígeno del medio.



Figura 9. Valores porcentuales arena, limo y arcilla en los sedimentos y suelos de las cuencas de Tavera y Sabana Yegua

A la vista de estos dos procesos químicos se puede considerar que, si por un lado el exceso del fósforo retenido en los sedimentos de la mayoría de los embalses se vuelve perjudicial para todo el desarrollo de estos sistemas, por otro, podrá ser ampliamente ventajoso si se procede a una recogida de las capas superficiales (donde se concentran preferentemente la mayoría de los nutrientes) y si se utilizan como suelos o aditivos en suelos estériles, evitando así la recurrencia a los fertilizantes.

El potasio, aunque sea absorbido en grandes cantidades por los vegetales (del orden de magnitud del nitrógeno), no interviene en la composición de sus sustancias vitales. Sin embargo, desempeña importantes funciones en la síntesis de muchos de los compuestos, manifestándose su deficiencia a través de graves perturbaciones en la planta.

Con un origen esencialmente en la meteorización de minerales silicatados como los feldspatos potásicos, moscovitas y biotita ($\approx 90\%$), minerales muy comunes en cualquiera de las cuencas de drenaje, no se podrá despreciar la procedencia de una pequeña parte de este elemento a partir de actividades humanas en particular las relacionadas con la utilización de los fertilizantes. A pesar de tener fundamentalmente origen detrítica e inorgánica, es un elemento biogénico debido a su utilización por la vegetación. Por este motivo, su contenido en el medio acuático sufre variaciones acentuadas en función del ciclo vegetativo de las plantas.

En vista a la totalidad de los embalses, los contenidos de la fracción total de fósforo en forma de fosfato de los sedimentos son más elevados y más heterogéneos en Sabana Yegua (figura 10), poseyendo el valor más alto, el sedimento localizado en la entrada del río de las Cuevas (SY14), bajo la influencia del sector de rocas carbonatadas constituidas por calizas, calizas detríticas, areniscas calcáreas y margas. También se verifica heterogeneidad en los contenidos de fósforo en los suelos de la cuenca, con valores más elevados observados en 3 distintos tipos de suelos, pertenecientes a 3 distintas sub-cuencas: (1) suelo SYS7 en el sector de rocas magmáticas volcano-sedimentarias predominantemente originadas en arco de islas en la sub-cuenca de Rio Grande o del Medio, (2) suelo SYS3 ubicado en el Sector de Terrazas (Conglomerados, arenas, molassa continental, caliza detrítica) en la sub-cuenca Yaque del Sur y (3) suelo SYS8 en el sector de rocas carbonatadas: calizas, calizas detríticas, areniscas calcáreas, margas en la sub-cuenca de Rio de Las Cuevas. Aunque con una distribución heterogénea, los valores medios de P-PO₄ en la fracción total, es muy idéntica en los suelos (valores medios de 3184,86 mg P-PO₄/Kg) y sedimentos (valores medios de 3114,10 mg P-PO₄/Kg). En Tavera, la distribución de los contenidos de fósforo en los sedimentos, es muy homogénea en toda la extensión del embalse (figura 11), con valores medios ligeramente más bajos que en Sabana Yegua (2569,856 mg P-PO₄/Kg), lo que indica una mayor homogeneidad en la sedimentación de este sistema.

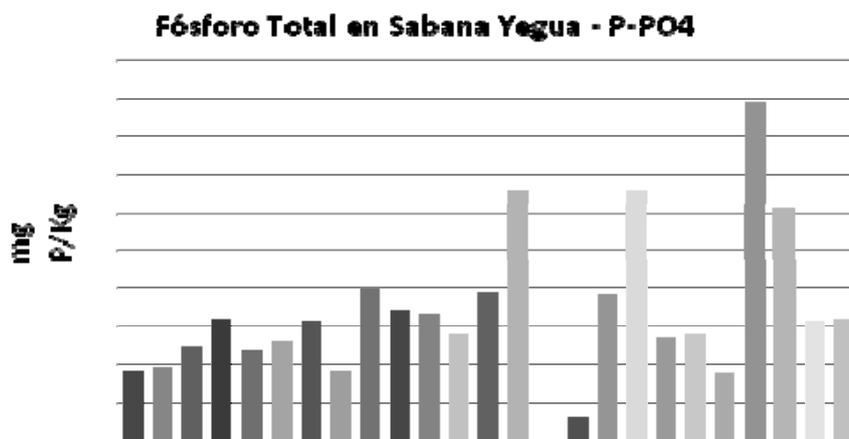


Figura 10. Distribución de los contenidos medios de P-PO₄ en la fracción total de sedimentos de Sabana Yegua y en los suelos de su cuenca

La misma homogeneidad se observa en los suelos de la cuenca, posiblemente reflejo de su mayor uniformidad litológica, en relación con la cuenca de Sabana Yegua, donde aflora una mayor variedad de rocas. Los valores medios de los suelos de la cuenca

son significativamente más bajos (valores medios de 604,71 mg P-PO4/Kg) cuando comparados con los sedimentos, indicando un enriquecimiento de este importante nutriente en los materiales depositados en los embalses.

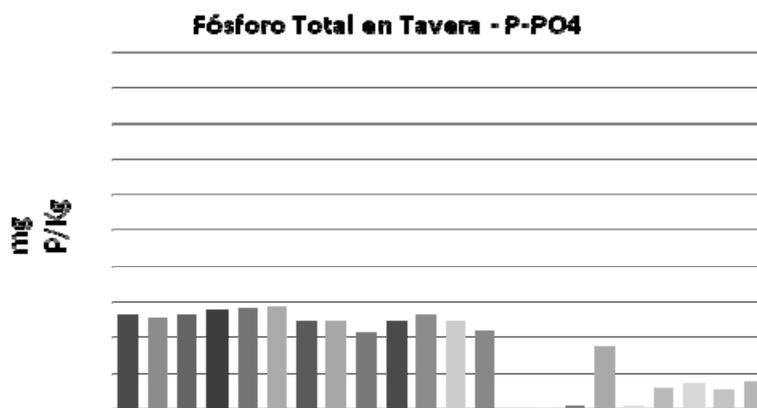


Figura 11. Distribución de los contenidos medios de P-PO4 en la fracción total de sedimentos de Tavera y en los suelos de su cuenca

De las diferentes formas de fósforo retenidas en los sedimentos, sólo el fósforo inorgánico soluble en forma de ion ortofosfato es directamente accesible y asimilable por las plantas acuáticas, siendo sus altos contenidos los principales responsables de la eutrofización de los embalses. En los suelos, es también esta forma de fósforo que las plantas terrestres más fácilmente asimilan, siendo su concentración una medida del nivel de fertilidad. La concentración de estos iones en la solución del suelo es, sin embargo, muy reducida, por lo que en la mayoría de las producciones agrícolas es necesario recurrir a su utilización en forma de fertilizantes. En términos de asimilabilidad, la segunda fracción más disponible corresponde al fósforo adsorbido a la fase sólida. Cuando se compara con los límites tabulados para suelos agrícolas, los análisis del contenido de fósforo disponible efectuados en los sedimentos de

los embalses, muestran valores medios a bajos (tabla 2), en Sabana Yegua y Tavera, aunque considerablemente más elevados que los valores correspondientes en los suelos de sus cuencas, que son clasificados como muy bajos, mientras que (1) los valores de la fracción total de fósforo son muy similares en los sedimentos y en los suelos de sus cuencas y son relativamente homogéneos y (2) los contenidos de la fracción disponible son más bajos en los suelos y con mayor heterogeneidad, se puede deducir que los procesos de solubilización del fósforo deberán ser marcadamente diferentes en los 2 conjuntos de materiales geológicos, suelos y sedimentos. Esta diferencia deberá basarse fundamentalmente en la distinta composición mineralógica y química de los sedimentos de fondo, la cual condiciona una mayor o menor retención de este elemento.

Tabla 2. Clasificación de la Fertilidad del suelo, en relación a los contenidos de P y K disponibles

Clasificación de la Fertilidad del suelo		P e K (mg.kg ⁻¹)
Muy baja		< 25
Baja		25-50
Media		50-100
Alta		100-200
Muy Alta		> 200

En la figura 12 están representadas las relaciones entre los valores de las dos formas de fósforo, total y disponible, en los sedimentos y suelos de los dos embalses, donde es posible comprobar una disminución de la proporción P disponible / P total en los suelos y valores ligeramente más bajos de la forma más soluble de P en los sedimentos de Sabana Yegua en relación a los de Tavera.

De acuerdo con la posibilidad para ser absorbido por las plantas, el potasio existente en los suelos y los sedimentos se puede subdividir en cuatro formas: (1) potasio en la estructura del mineral (no intercambiable), (2) potasio fijado en los minerales de arcilla, (3) potasio adsorbido en coloides minerales y orgánicos (forma rápidamente permutable) y (4) potasio en solución. Este último

constituye la forma más prontamente disponible para la absorción, encontrándose generalmente en los suelos en concentraciones muy bajas. Como no posee retención química, si no es inmediatamente asimilado es fácilmente lixiviado por las aguas, siendo posteriormente reabastecido por las otras formas que van, de este modo, a tener una importancia vital en la disponibilidad de este nutriente. El potasio adsorbido en los coloides (minerales y orgánicos) forma parte de las principales bases de intercambio, pudiendo ser fácilmente solubilizado por intercambio con otros cationes existentes en solución o ser directamente absorbido por las plantas a través de fenómenos de intercambio por contacto. Por esta razón se considera como una forma fácilmente permutable, siendo su contenido muy importante en términos de fertilidad.

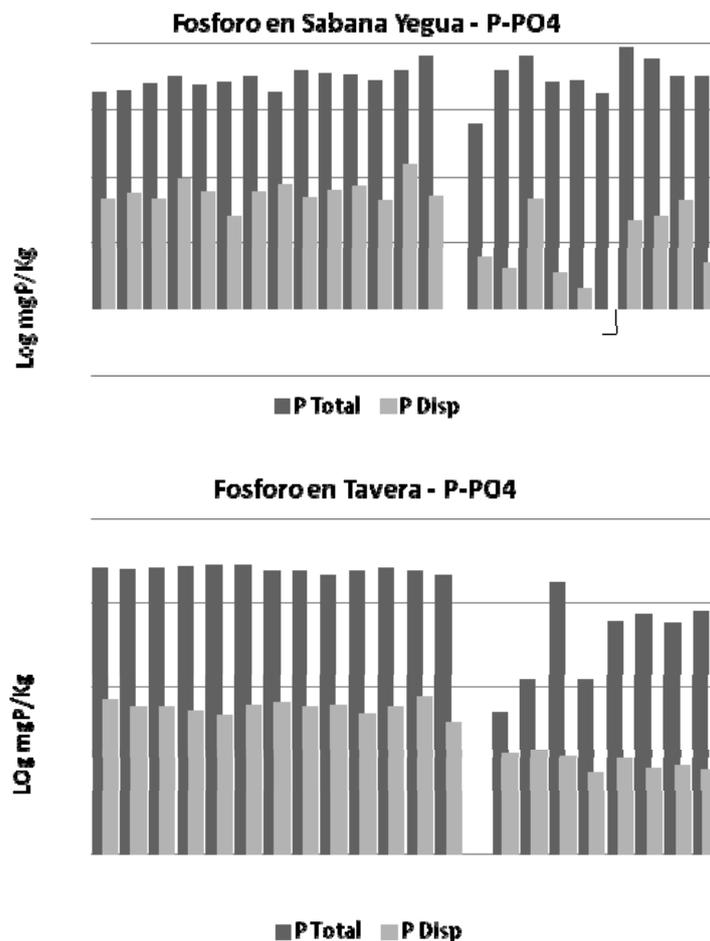


Figura 12. Relación entre los contenidos de P total y P disponible en los sedimentos y suelos de Sabana Yegua y Tavera

El potasio existente en solución es la forma directamente utilizable por las plantas y su concentración constituye un índice de disponibilidad inmediata de este elemento así, es la forma de potasio con mayor interés desde el punto de vista de la fertilidad. En la mayoría de los suelos, su contenido es relativamente bajo, representando una pequeña fracción (en promedio inferior al 2%) del potasio total. Los contenidos de esta forma potásica en los sedimentos de los dos embalses, independientemente de su distribución espacial y de las características de los sedimentos, son en general altos a muy altos, siendo en general superiores a sus contenidos en los suelos (tabla 3). Sabana Yegua tiene los sedimentos con valores más altos, debido probablemente a su litología más rica en minerales potásicos, como moscovita, biotita, ilitas y feldespato-K. Estos minerales deberán ser más frecuentes en las rocas detríticas del sector de rocas carbonatadas: calizas, calizas detríticas, areniscas calcáreas y margas de la

sub-cuenca del Río de Las Cuevas. Con efecto, los suelos que tienen contenidos más altos de K disponible (SYS8 y SYS9) están ubicados en las márgenes de este río. Los valores más elevados de la forma más disponible de potasio en los sedimentos en relación a los suelos de las respectivas cuencas se podrán deber a una mayor facilidad de liberación de este elemento en la fase soluble, que puede ser facilitado por diversos factores entre los que se incluyen: (1) un alto porcentaje de componente de arcilla en la mayoría de los sedimentos, (2) un ambiente químico y biológico propicio a procesos de alteración y (3) predominio de minerales potásicos fácilmente alterables. Los altos contenidos de la forma de potasio más fácilmente absorbible por las plantas (potasio soluble) en los dos embalses estudiados, indican la buena calidad de los materiales depositados en el fondo de estos embalses para aprovechamiento agrícola, en lo que se refiere a este nutriente.

Tabla 3. Contenido de K y P en formas disponibles en los sedimentos y suelos de Sabana Yegua y Tavera

Sabana Yegua			Tavera		
Muestras	K Disp (mg/Kg)	P Disp (mg/Kg)	Muestras	K Disp (mg/Kg)	P Disp (mg/Kg)
SEDIMENTOS					
SY1	200,084	49,191	T1	87,002	70,750
SY2	336,740	59,733	T2	98,385	57,138
SY3	195,485	48,964	T3	98,734	56,623
SY4	204,435	95,946	T4	117,055	51,729
SY5	247,965	62,712	T5	102,370	46,281
SY6	239,420	24,977	T6	96,381	59,297
SY7A	169,354	61,397	T7	82,281	65,867
SY8A	176,221	77,478	T8	83,430	57,631
SY9	187,438	50,537	T9	82,047	60,878
SY10	156,445	65,746	T10	84,055	46,818
SY11A	220,411	76,223	T11	112,421	58,087
SY12	175,407	45,954	T12	126,736	80,681
SY13	141,739	154,139	T13	87,866	39,421
SY14	144,476	51,779			
SUELOS					
SYS1	56,720	6,067	TS1	74,843	16,194
SYS2	183,564	4,127	TS2	128,125	17,521
SYS3	249,459	47,894	TS3	169,493	15,076
SYS4	65,944	3,709	TS4	52,257	9,494
SYS5	103,886	< 2,00	TS5	45,106	14,041
SYS6	98,813	0,399	TS6	83,187	10,784
SYS7	132,579	21,781	TS7	112,655	11,638
SYS8	484,917	25,293	TS8	93,551	10,767
SYS9	498,361	45,956			
SYS10	77,434	4,941			

Una vez dragados los sedimentos y expuestos a condiciones aéreas (para ser utilizados como suelos o aditivos), se crean las condiciones favorables a un aumento de los procesos de alteración que, asociados a texturas generalmente finas y a altos niveles de biotita en las formaciones de las cuencas de drenaje, conducirán probablemente a un aumento de los niveles de las formas soluble y de cambio de este elemento.

3.2.2 Macronutrientes secundarios (Ca y Mg) y micronutrientes metales (Fe, Mn, Zn, Cu) biodisponibles

Los macronutrientes secundarios, no siendo menos importantes para las plantas que los macronutrientes principales, existen generalmente en los suelos en cantidades suficientes. Son elementos de origen fundamentalmente detrítico, por lo que las variaciones presentadas entre los dos embalses y en el mismo embalse en toda su extensión (Fig. 13), están relacionadas con la naturaleza de las rocas de las cuencas de drenaje, con el transporte de las partículas minerales ricos en Ca y Mg y con las condiciones hidrodinámicas del medio. En cualquiera de los elementos existe notoriamente mayor dispersión de contenidos en lo embalse que tiene mayor diversidad de litología, Sabana Yegua. Este es también el embalse con valores más altos en los sedimentos, en especial de calcio, lo que está de acuerdo con la presencia de rocas carbonatadas en su cuenca, principal fuente de este elemento. Además, los suelos con contenidos más altos son los ubicados en la sub-cuenca de Rio de Las Cuevas, sobre rocas carbonatadas: calizas, calizas detríticas, areniscas calcáreas y margas (SYS8 y SYS9). Por su gran movilidad química, es un elemento rápidamente lixiviado a partir de cualquier mineral que lo tenga en su estructura. Una vez solubilizado y transportado al embalse, este elemento puede mantenerse en solución en el agua, pudiendo una parte de él ser posteriormente retenido por adsorción o mantenido en fase soluble en las partículas minerales y orgánicas de los materiales depositados. Debido a los altos niveles de su forma más soluble, significativamente superior a sus valores en los suelos, lo que a menudo no ocurre en otros sistemas idénticos, se puede considerar que los sedimentos tienen una elevada capacidad de retención de este elemento. El magnesio tiene una distribución más heterogénea, en especial en los suelos, dado que es un elemento que puede ser suministrado a los

sedimentos por una gran diversidad de minerales, bien representados en la generalidad de las rocas de las cuencas de drenaje. Esa diversidad de fuentes mineralógicas es observable por los suelos con contenidos más elevados de Mg disponible (SYS1, SYS4 y SYS6), correspondientes a suelos pertenecientes a distintas cuencas (Yaque del Sur y Rio Grande o Medio) y a distintas litologías (tonalitos y rocas magmáticas volcano-sedimentarias). Puede también ser observado por los valores medios muy similares en los sedimentos de los dos embalses. La distribución del Mg disponible en los sedimentos de Sabana Yegua y Tavera revela, además de la importancia de la naturaleza de las rocas de las cuencas de drenaje, dominadas por materiales hierro-magnesianos, la menor solubilidad de este elemento en relación con el calcio; la mayor parte del magnesio deberá ser arrastrada en asociación con la estructura de las partículas minerales meteorizadas y posteriormente depositada en el fondo de estos sistemas. Aunque la mayoría de los suelos no presentan a priori deficiencias en estos dos nutrientes, el uso intensivo de los suelos, el regadío, el uso de plantas más exigentes y la sustitución de los abonos tradicionales por otros, lleva a que cada vez sea necesario aplicar estos nutrientes bajo la forma de fertilizantes, por lo que los elevados valores de calcio y magnesio en formas más fácilmente asimiladas por las plantas, en especial en los sedimentos de Sabana Yegua, muestran tener gran ventaja para fines de mejorar la cualidad de fertilidad de los suelos. Los contenidos de las formas disponibles de Ca, Mg y de los micronutrientes metales (Fe, Mn, Zn y Cu) están representados en la tabla 4. Los micronutrientes metales (Fe, Mn, Zn, Cu) son esenciales para el crecimiento de las plantas y presentan un alto coeficiente de eficacia, pero las plantas sólo les utilizan en cantidades mínimas. El gran interés de su estudio en la evaluación de la fertilidad de un suelo reside en el papel dominante que desempeñan como activadores de numerosos sistemas enzimáticos y por qué arriba de ciertos límites se consideran tóxicos. En los suelos y sedimentos de los embalses, la distribución de estos elementos, así como las diferentes formas con que surgen, son determinadas por las características geoquímicas de los materiales de alteración que representan sus fuentes (pertenecientes a suelos o las capas de alteración de las rocas) los cuales, a su vez, los heredan de las rocas madre. Los minerales que contienen estos elementos funcionan como depósitos,

liberándolos más o menos lentamente a la fase soluble a medida que van siendo alterados. Los procesos de cambio se convierten en un factor crítico de la fertilidad de los sedimentos. Las partículas con

mayor importancia como "depósitos" de elementos metálicos son las especies termodinámicamente inestables, amorfas o débilmente cristalizadas.

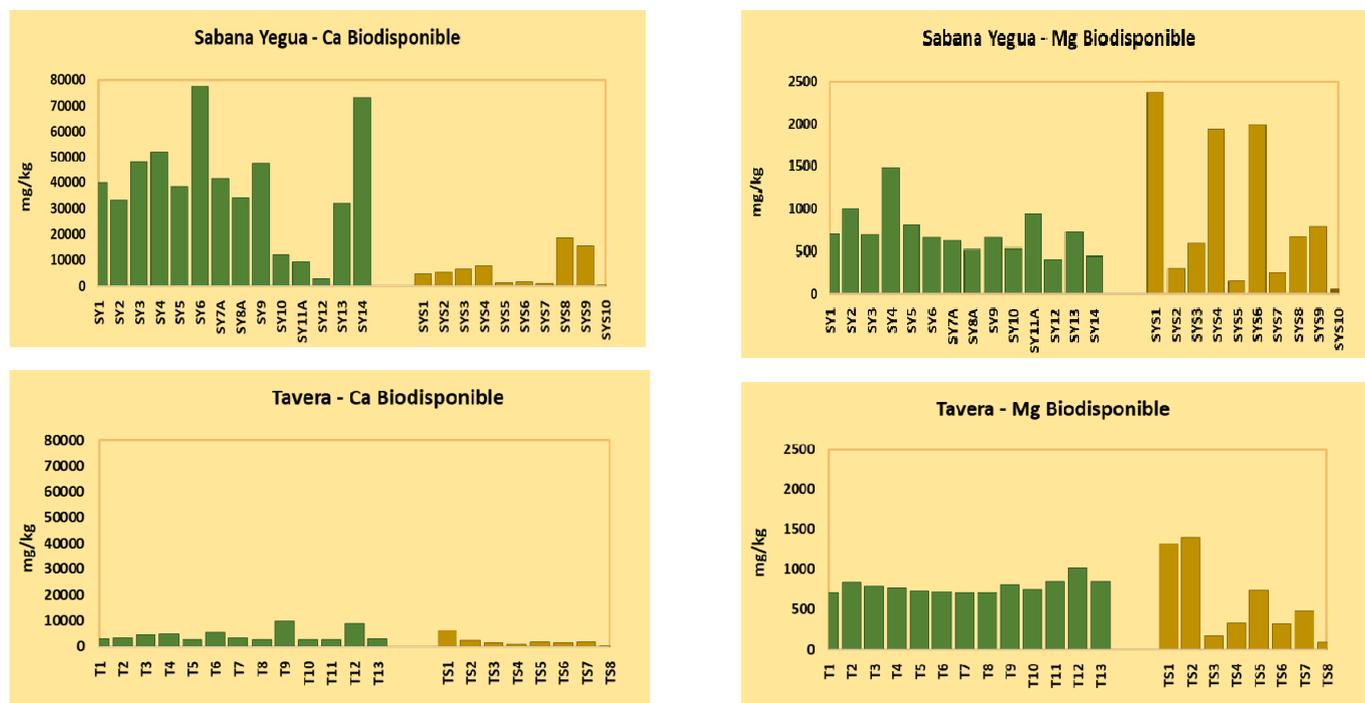


Figura 13. Distribución de Ca y Mg en formas disponibles, en sedimentos de los embalses de Sabana Yegua y Tavera (a verde) y en suelos de las cuencas de drenaje (a amarillo)

Observando los valores de las fracciones disponibles de los micronutrientes presentados en la tabla 4 y en la figura 14, hay una gran homogeneidad en el patrón de distribución de elementos metálicos en toda la extensión de los embalses, que es debido, posiblemente, a (1) su origen a partir de las mismas fuentes en las cuencas de drenaje y (2) la ocurrencia en los sedimentos, en las mismas formas y con asociación preferencial al mismo tipo de constituyentes minerales y orgánicos.

Algunas excepciones a esta uniformidad de distribución de los contenidos de estos elementos, corresponden a sedimentos localizados en sectores que son preferentemente alimentados por determinados tipos de rocas. Esto es el caso por ejemplo de lo Mn, que en Sabana Yegua tiene valores más bajos que los valores medios en los sedimentos del sector del embalse ubicado en la desembocadura del río Yaque del Sur (SY12 y SY10) o en Tavera, donde los sedimentos de 2 puntos ubicados cerca del

muro de la represa, presentan valores superiores a los de los restantes materiales depositados. La heterogeneidad que se verifica en los sedimentos de ambos los sistemas, contrariamente a los restantes elementos, indica la existencia de otros factores más influyentes en la solubilización de este elemento.

En relación al Fe o al Cu, solamente en Sabana Yegua los sedimentos dispuestos a la entrada del río de las Cuevas (SY14) tienen valores inferiores a los valores medios observados en toda la extensión del lago. Considerando que los principales minerales que constituyen fuentes de estos elementos son minerales Hierro-magnesianos, principales constituyentes de las rocas básicas y ultrabásicas, es fácil de comprender que los materiales depositados en el embalse de Tavera tengan contenidos más altos de Fe y Mn que los de Sabana Yegua, dado que tienen mayor influencia en su alimentación, de rocas magmáticas vulcano-sedimentarias. En Tavera, los valores de Fe son considerablemente más altos que los suelos de su

cuenca (alrededor de 5 veces superiores) y que los observados en Sabana Yegua. Los contenidos mayores corresponden a los sedimentos ubicados en las márgenes del embalse (T9, T12) donde la vegetación es más densa, lo que puede aumentar las condiciones de reducción del medio y, consecuentemente, la solubilidad de este elemento.

Las deficiencias e intoxicaciones provocadas por estos nutrientes pueden depender de las formas químicas en que los elementos ocurren, en consecuencia, del carácter predominantemente

reductor oxidante del medio. De acuerdo con los valores del potencial redox, estos metales tienden a presentarse en formas más oxidas (por ejemplo, MnO_2 , Fe^{3+}) o más reducidas (Mn^{2+} , Fe^{2+}), siendo que las formas más reducidas son las más solubles.

Así, en el momento de la utilización de los sedimentos como suelos agrícolas, bajo condiciones aéreas, estos micronutrientes tienden a presentarse en formas más oxidadas, lo que disminuirá naturalmente su disponibilidad para las plantas.

Tabla 4. Contenidos de macro-nutrientes secundarios (Ca y Mg) y micronutrientes metales (Fe, Mn, Zn, Cu) en formas disponibles en los sedimentos de Sabana Yegua y Tavera, y en los suelos de las cuencas de drenaje

Muestras	mg/Kg					
	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
SY1	39824,18	21,66	563,82	699,72	276,56	2,88
SY2	33140,63	23,04	963,65	993,49	283,24	3,97
SY3	47869,69	20,93	509,99	695,34	309,10	3,19
SY4	51991,48	18,46	308,87	1488,27	213,96	1,46
SY5	38472,77	27,38	843,78	809,01	293,94	3,09
SY6	77243,22	17,89	393,63	657,81	260,71	2,19
SY7A	41556,59	28,65	684,16	625,51	265,71	2,31
SY8A	33968,73	26,28	726,14	521,91	248,52	1,92
SY9	47446,01	29,44	729,29	657,95	267,73	2,28
SY10	12220,10	24,69	909,84	528,00	170,76	1,83
SY11A	9311,63	19,82	877,31	932,21	251,98	1,76
SY12	2830,73	14,93	724,65	404,16	83,88	1,29
SY13	32054,67	23,44	648,96	737,58	371,29	3,18
SY14	73022,54	9,70	281,53	440,61	231,27	1,65
MEDIA	38639,50	21,88	654,69	727,97	252,05	2,36

Embalse de Sabana Yegua - 1ª Campaña Sedimentos

MUESTRAS	mg/Kg					
	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
SYS1	4653,34	8,03	615,24	2366,90	268,12	22,67
SYS2	5332,28	6,48	138,10	299,48	141,72	5,09
SYS3	6422,33	9,95	397,00	585,59	191,33	4,66
SYS4	7838,67	10,88	312,74	1935,06	136,85	7,02
SYS5	1128,18	8,70	81,80	157,12	288,50	10,91
SYS6	1423,58	8,28	188,20	1978,23	86,09	4,14
SYS7	967,21	6,85	303,14	235,94	120,24	8,64
SYS8	18454,70	5,89	247,88	662,59	262,55	5,89
SYS9	15580,94	10,60	294,81	787,57	325,64	10,13
SYS10	181,71	3,27	214,80	52,56	18,16	13,10
MEDIA	6198,30	7,89	279,37	906,11	183,92	9,22

Suelos

Muestras	mg/Kg					
	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
T1	2866,68	21,24	1565,78	705,90	798,59	3,04
T2	3279,60	28,20	1699,21	837,38	385,20	2,69
T3	4556,92	26,93	1548,88	788,88	330,00	2,49
T4	4966,19	24,21	1394,35	767,72	269,81	2,40
T5	2832,00	25,21	1638,57	732,45	364,86	2,53
T6	5522,96	24,61	1672,28	721,46	330,40	3,14
T7	3199,40	20,21	1377,05	702,10	298,18	3,67
T8	2791,85	18,75	1321,86	706,91	398,65	3,67
T9	9628,99	30,33	2528,93	810,93	307,39	2,30
T10	2743,14	23,57	1745,28	750,67	455,59	2,64
T11	2765,60	21,60	1987,80	852,50	861,95	3,14
T12	8770,18	30,93	2161,16	1019,99	337,14	2,15
T13	2990,31	29,17	1947,51	845,68	452,92	2,18
MEDIA	4377,99	25,00	1737,59	787,89	430,05	2,77

Embalse de Tavera - 1ª Campaña Sedimentos

MUESTRAS	mg/Kg					
	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
TS1	6185,24	11,92	570,93	1321,35	136,54	25,81
TS2	2522,38	20,71	528,29	1402,33	174,95	13,37
TS3	1340,06	10,09	273,00	163,45	761,37	18,44
TS4	764,48	3,99	161,12	326,64	7,49	5,17
TS5	1819,49	7,15	160,91	744,23	98,57	5,24
TS6	1520,77	9,52	274,82	325,43	189,98	11,01
TS7	1714,41	6,23	400,90	482,37	68,27	22,47
TS8	334,00	7,29	493,82	90,10	22,84	9,30
MEDIA	2025,10	9,61	357,98	606,99	182,50	13,85

Suelos

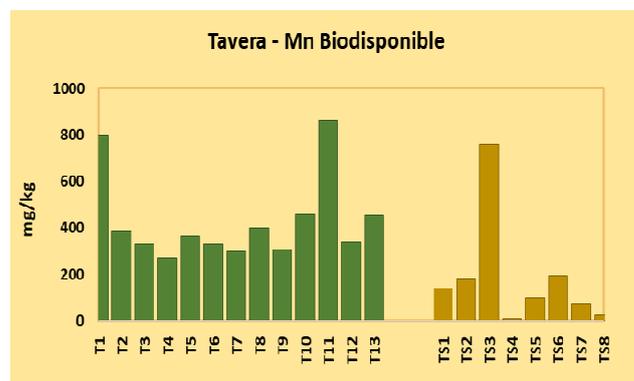
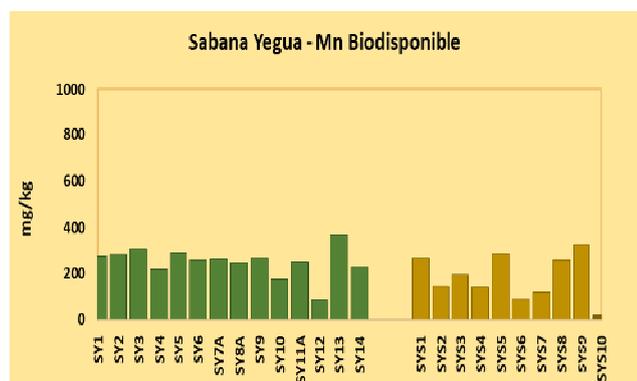


Figura 14. Distribución de Mn en formas disponibles, en sedimentos de los embalses de Sabana Yegua y Tavera (a verde) y en suelos de las cuencas de drenaje (a amarillo)

3.2.3 Geoquímica de la fracción total de elementos mayores (Si, Al, Ti, Fe, Mg, Ca, K, Na, Mn, P) y menores (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Zn)

La naturaleza y la calidad de los sedimentos de los embalses para uso agrícola están condicionadas por la totalidad de los minerales que entran en su constitución. Estos minerales constituyen una reserva mineral y de su naturaleza química depende el contenido de los elementos que existen en fase soluble o de cambio y que pueden ser suministrados a las plantas. Para el desarrollo de éstas es necesaria sólo una cantidad de elementos químicos bastante limitada. Dentro de los elementos son importantes el O, C, H, N, P, Ca, K, Mg y el S. Con menor importancia en el ciclo vegetativo, pero también necesarios, aunque en más reducidas dimensiones, constan el Mn, Fe, Zn, Cu, Mo, B y el Cl. Todos estos elementos son indispensables para el metabolismo y la producción vegetal, donde desempeñan funciones específicas, siendo por esta razón considerados como elementos nutritivos o nutrientes vegetales.

3.3 Análisis Económico

La metodología aplicada mostro los siguientes resultados:

Los costos de la mano de obra para la aplicación de los sedimentos como enmienda agrícola para cultivo de ajíes gustosos (*Capsicum annum*) resultan demasiado elevado. Al usar los sedimentos como enmienda para fertilizar los cultivos el costo de aplicación de los sedimentos dispara el costo de la mano de obra en un 148.94%. Esto repercute en que el costo total de producción se incremente en un en términos relativos en un 106.55%.

Los rendimientos o productividad del ají gustoso resultan muy bajos usando los sedimentos como enmienda de fertilización, comparados con los rendimientos del uso de la fertilización química, dado que con los sedimentos apenas se obtienen 2.70QQ/Ta., mientras que con los fertilizantes químicos se obtienen rendimientos de 15QQ/Ta.

La rentabilidad del uso de los sedimento como enmienda para fertilización de los suelos para la producción de ajíes es negativa. Por cada tarea que se siembra de ajíes gustosos la se pierden RD\$24,504.90/Ta.; lo que representa una pérdida de RD\$389,627.91/Ha.

Los estudios que se han hecho hasta la fecha no son conclusivos como para descartar el uso de los sedimentos como fuente de fertilización para cultivos. Porque los estudios que realizaron los estudiantes de la UASD reflejaron buen desarrollo vegetativo de las plantas y a partir de esto recomendaron su uso como enmienda para la fertilización de suelos degradados.

4. CONCLUSIONES

El análisis conjunto de la geología de las cuencas de drenaje y de los datos de distribución de las clases texturales de los sedimentos de fondo referentes a un período de mayor acarreado detrítico nos lleva a concluir:

1. Que en cualquiera de los sistemas estudiados la naturaleza del material originario y el clima, dominado por una precipitación elevada y uniforme en la cuenca de Tavera y por condiciones más secas en Sabana yegua, donde afloran extensas áreas de rocas carbonatadas y, la sedimentación del calcio en este embalse son los factores preponderantes en la distribución granulométrica de los materiales.
2. Los resultados de los análisis, en cuanto a los elementos considerados más tóxicos y con grandes influencias de actividades antrópicas (As, Cd y Pb), cualquiera de ellos se encuentra en los sedimentos y suelos en concentraciones por debajo de los límites medios en suelos minerales y no alcanzan los límites de toxicidad.
3. En relación a los elementos traza encontrados en los análisis, no parece haber inconveniente para la utilización de los sedimentos para uso agrícola. Esto fue confirmado en el ensayo del cultivo de ají gustoso realizado posteriormente.
4. El aumento de los contenidos de elementos orgánicos y de las propiedades de retención e intercambio de cationes en los sedimentos, evidencian mejores cualidades de fertilidad cuando se compara con los suelos de las cuencas que les dan origen.
5. El análisis económico revela que la utilización de estos sedimentos como

fertilizantes lo hace no rentable para los productores, debido a los altos costos de la extracción, desecación, transporte y aplicación a nivel parcelario. Sin embargo, se

recomienda que se hagan otros estudios en nuevas zonas agroclimática y con otros cultivos más rentables para evaluar la rentabilidad

REFERENCIAS

- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. INDRH. (2016). Proyecto de Recuperación de Emergencia y Gestión del Riesgo por Desastres Naturales. Préstamo BIRF7546-Do. Informe de Toma de Muestras y Analítica de Calidad de las Aguas. INFRAECO.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. INDRH. (2016). Proyecto de Recuperación de Emergencia y Gestión del Riesgo por Desastres Naturales. Préstamo BIRF7546-Do. Informe de Toma de Muestras, Analítica y Volumen de los Sedimentos. INFRAECO.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). Atlas de Biodiversidad y Recursos Naturales de la República Dominicana, 1ra edición, ediciones Amigo del Hogar, CxA. Santo Domingo, República Dominicana.
- Pérez, F. (2015). 5to. Informe Técnico de Avance proyecto Moldeamiento de los Regímenes Hidrológicos y de los Procesos Erosión/Sedimentación y Simulación de Escenarios para la Restauración de Cuencas Hidrográfica. FONDOCYT-CEHICA-INDRHI.
- Pérez, F. (2015). 6to. Informe Técnico de Avance proyecto Moldeamiento de los Regímenes Hidrológicos y de los Procesos Erosión/Sedimentación y Simulación de Escenarios para la Restauración de Cuencas Hidrográfica. FONDOCYT-CEHICA-INDRHI.
- Norma Ambiental Sobre Control de Descargas a Aguas Superficiales, Alcantarillado Sanitario y Aguas Costeras del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2012).
- Fonseca, R. (1995). The nature of the sediments of Maranhão dam reservoir: study of their quality for agricultural use. Unpublished. MSc. Thesis, University of Évora, 189 p. [In Portuguese].
- Fonseca, R. (2002). Dam Reservoirs as Barriers to the Natural Sediment Transport Cycle. Geological study of the reutilization of sediments from Portuguese and Brazilian Systems. Unpublished. Ph. D. Thesis, University of Évora, 649 p. (In Portuguese).
- Fonseca, R., Barriga, F. & Fyfe, W. (2003). Dam Reservoir Sediments as Fertilizers and Artificial Soils. Case Studies from Portugal and Brazil. Water and Soil Environments, Biological and Geological Perspectives, Kazue Tazaki (Eds.), International Symposium of the Kanazawa University 21st – Century COE Program, Kanazawa, Japan, pp. 55-62.
- Fonseca R., F. Barriga., S. Theodoro., T. Canário & M. Morais. (2007). The Três Marias reservoir: a sink for sediments outcoming from overerosion of soils in Minas Gerais, Brazil. In: Sobral, M. and Gunkel, G. (Eds.) "Reservoir and River Basin Management: Exchange of Experiences from Brazil, Portugal and Germany". Technical University of Berlin, Berlin, pp. 182-196.
- Fonseca, R., Barriga, F. & Tazaki, K. (2007). Land erosion and associated evolution of clay minerals assemblages from soils to artificial lakes in two distinct climate regimes in Portugal and Brazil. Clay Minerals”, Journal of the European Clay Groups, Mineralogical Society, 42(2), pp. 153-171.
- Fonseca, R., Barriga, F.J.A.S., & Conceição, P. (2010). Clay minerals in sediments of Portuguese reservoirs and their significance as weathering products from over-eroded soils. Comparative study of the Maranhão, Monte Novo and Divor Reservoirs (South Portugal). International Journal of Earth Sciences, 99, 1899–1916. 51

- Fonseca, R., Patinha, C., Barriga, F.J.A.S & Morais, M. (2012). Role of the sediments of two tropical dam reservoirs in the flux of metallic elements to the water column. *Journal of Water Science and Technology*. 66.2, 254-266: doi: 10.2166/wst.2012.169.
- Fonseca, R., Barriga, F. & Fyfe, W. (1992). The nature of dam sediments: Conversion a global problem to a global resource. A case study. *Proceedings, VIII International Colloquium for the Optimization of Plant Nutrition for the Developments in Plant and Soil Sciences*. p. 210.
- Fonseca, R. & Barriga, F. (1998). Chemical and mineralogical characterization of the bottom sediments from two Portuguese reservoirs (Maranhão and Monte Novo) in order to control eutrophication. *I Iberian Congress of Limnology, IX Spanish Congress of Limnology, University of Évora*. Abstracts nº 152.
- Fonseca, R. & Theodoro, S. (2005). New challenges in the Portuguese-Brazilian Agrogeology: chemical rehabilitation of impoverished soils through the use of renewable geological resources. *Proceedings of the VIII Congress of Geochemistry of the Portuguese speaking countries and XIV Geochemistry Week, volume 2*, pp. 647-651, Department of Geosciences, University of Aveiro, Portugal.

Como citar este artículo:

Segura, B., y Ferreira, R. (2020). Aprovechamiento de los sedimentos de los embalses como nutrientes para la fertilización de suelos agrícolas en la República Dominicana. *Aqua-LAC Volumen 12(2)*, 15-36. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental
para América Latina y el Caribe

Avances en el pronóstico operacional de corto plazo y la evolución futura de largo plazo del fenómeno de la turbiedad en el río Maipo

Advances in the short-term operational forecast and the long-term future evolution of the turbidity phenomenon in the Maipo River

Carlos Poblete ^{1*}, Francisco Suárez ², Sebastián Vicuña ³, Carolina Meruane ⁴
Alberto de La Fuente ⁵, Jorge Reyes A ⁶

Recibido: 07/04/2020

Aceptado: 04/08/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

El fenómeno de la turbiedad extrema ha sido abordado en trabajos previos a través del análisis de eventos históricos, estudios que han permitido, además de caracterizar y comprender de mejor forma el fenómeno, estar en condiciones de intentar una predicción del mismo. Se presentan a continuación avances conseguidos en dos líneas de predicción: 1) pronósticos operacionales de corto plazo, alimentados por forzantes que gatillan aumentos de turbiedad en el río y 2) evolución futura de largo plazo, considerando los patrones de cambio climáticos que pueden ocurrir sobre la cuenca del Maipo. El modelo operacional pronostica la serie de tiempo horaria de turbiedad para un horizonte de 3 días y consiste en un modelo híbrido que combina información geomorfológica y meteorológica de la cuenca, unida a un pronóstico hidrometeorológico base, con algoritmos Deep Learning que definen el peso de cada forzante. Desde su puesta en operación, la herramienta se ha utilizado para generar advertencias del tipo alerta temprana y estimaciones del tiempo de duración de la emergencia. La evolución futura del fenómeno se abordó utilizando simulaciones de un modelo climático de alta resolución las cuales alimentaron un modelo hidrológico local, resultados que unidos a un modelo basado en redes neuronales, generaron series diarias de turbiedad. Respecto de la situación actual y bajo un escenario de Cambio Climático RCP 8.5, se esperarían para el futuro incrementos en el número de eventos, en la duración máxima y magnitud media asociada y aparentes reducciones en las intensidades máximas de los mismos. Si bien ambas herramientas deben seguir siendo evaluadas, se consideran interesantes alternativas para avanzar en la predicción del comportamiento del fenómeno, tanto en el corto como en el largo plazo.

Palabras clave: turbiedad, predicción, pronóstico meteorológico, simulación climática, modelación, redes neuronales

Abstract

The phenomenon of extreme turbidity has been addressed in previous works through the analysis of historical events, studies that have allowed, in addition to better characterize and understand the phenomenon, to be able to try to predict it. Advances achieved in two lines of prediction are presented below: 1) short-term operational forecasts, fed by forcings that trigger turbidity increases in the river, and 2) long-term future evolution, considering the climatic change patterns that may occur in the Maipo basin. The operational model forecasts the hourly time series of turbidity for a 3-day horizon and consists of a hybrid model that combines geomorphological and meteorological information of the basin, coupled with a base hydrometeorological forecast, with Deep Learning algorithms that define the weight of each forcing. Since its implementation, the tool has been used to generate early warning warnings and estimates of the duration of the emergency. The future evolution of the phenomenon was addressed using simulations of a high-resolution climate model which fed a local hydrological model, results which, together with a model based on neural networks, generated daily turbidity series. With respect to the current situation and under an RCP 8.5 Climate Change scenario, increases in the number of events, in the maximum duration and associated average magnitude, and apparent reductions in the maximum intensities of these events are expected in the future. Although both tools should continue to be evaluated, they are considered interesting alternatives to advance in the prediction of the behavior of the phenomenon, both in the short and long term.

Keywords: turbidity, prediction, weather forecasting, climate simulation, modeling, neural networks.

1 Subgerencia de Planificación Técnica y Recursos Hídricos, Aguas Andinas, Chile. cpoblete@aguasandinas.cl

2 Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental UC, Chile. fsuarez@ing.puc.cl

3 Centro de Cambio Global UC, Chile. svicuna@ing.puc.cl

4 Modelación Ambiental SpA, Chile. cmeruane@modelacion.cl

5 Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile, Chile. aldelaflu@ing.uchile.cl

6 Aguas Andinas, Chile. jreyesa@aguasandinas.cl

1. INTRODUCCIÓN

Trabajos previos han ayudado a comprender el fenómeno de turbiedad en la cuenca del río Maipo a través del análisis de eventos históricos, sin embargo, es de interés avanzar hacia la posibilidad de una predicción de su comportamiento, tanto en el corto como en el largo plazo. El presente documento tiene como objetivo presentar los avances conseguidos hasta el momento en ambas líneas, mostrando los logros en cuanto a: 1) pronósticos operacionales de corto plazo alimentados por forzantes que gatillan aumentos de turbiedad en el río y donde la actualización continua es clave y 2) evolución futura de largo plazo, considerando los patrones de cambio climáticos que pueden ocurrir sobre la cuenca del Maipo en base a simulaciones climáticas globales. Las aguas del río Maipo se caracterizan por presentar una calidad que las hace adecuadas para la producción de agua potable mediante tecnologías de tratamiento convencionales. No obstante, en ocasiones la disponibilidad natural se ve afectada por eventos de crecidas con altas concentraciones de sedimentos en suspensión, alcanzando niveles de turbiedad que no permiten su tratamiento, representando un factor de vulnerabilidad para el sistema de producción de Aguas Andinas. Durante los últimos 10 años, se han conseguido importantes avances en la comprensión del fenómeno de turbiedades extremas. Dentro de lo anterior, destacan las mejoras conseguidas en su caracterización y cuantificación, el aumento observado en su ocurrencia y la modelación matemática de su recurrencia, lo que ha permitido poder estimar periodos de retorno según duración y umbral del episodio, así como dimensionar las obras necesarias para dotar a la compañía de la autonomía solicitada por la Autoridad. Junto a lo anterior, se ha intentado estudiar alguna relación de causalidad del fenómeno con la hidrometeorología de la cuenca con el objetivo de poder predecirlo. En principio parece evidente una relación de la turbiedad con el caudal del río, sin embargo, turbiedades entre 3.000 y 4.000 UNT (Valores límite sobre los cuales la producción de las plantas de tratamiento no puede ser 100%) se ha visto que ocurren en prácticamente todo el espectro de caudales, demostrando la no linealidad del fenómeno con las variables usuales. No obstante, en términos descriptivos, se han detectado 3 condiciones climatológicas que favorecen la ocurrencia de fenómenos de alza de turbiedades: Deshielos de verano, Precipitaciones convectivas y Precipitaciones

frontales con isoterma alta, aunque las relaciones no son lineales ni tampoco estrictas, lo que dificulta enormemente su pronóstico, materia aún pendiente y que aborda el presente documento.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una herramienta simple y robusta para el manejo y gestión en tiempo real de las operaciones de las plantas de agua potable, generando advertencias del tipo alerta temprana como también estimaciones del tiempo de duración de la emergencia.

2. METODOLOGÍA

Se desarrolló un modelo para el pronóstico horario de la serie de tiempo de turbiedad del agua en la captación Toma Independiente, para un horizonte de 3 días. Se trata de un modelo híbrido con actualización horaria que combina un modelo conceptual asociado a las forzantes que gatillan aumentos de turbiedad en el río, con algoritmos Deep Learning que definen el peso de cada forzante.

Para configurar las variables de entrada, se desarrollaron las siguientes actividades:

- Caracterización geomorfológica de la cuenca.
- Recopilación de información histórica horaria de turbiedades y caudales.
- Generación de eventos históricos, entendida como el conjunto de datos de entrada al modelo (precipitación, línea de nieve, etc.) y su respuesta (caudal y turbiedad horaria).
- Calibración, validación y testeo.

La configuración final para las variables de entrada consideró los datos de los 3 días anteriores y los 3 días futuros de las siguientes variables:

- Altura de la isoterma cero.
- Área aportante pluvial, tiempo de concentración.
- Precipitación total y convectiva y humedad relativa.
- Temperatura en la tropósfera, específicamente a 3.500 msnm.

Finalmente, también se requiere de la última medición turbiedad como condición adicional. La figura 1 siguiente muestra un esquema simplificado del funcionamiento. La metodología propuesta consistió en 4 etapas sucesivas de validación, calibración e implementación de modelos, según muestra la figura 2 y la descripción siguiente:

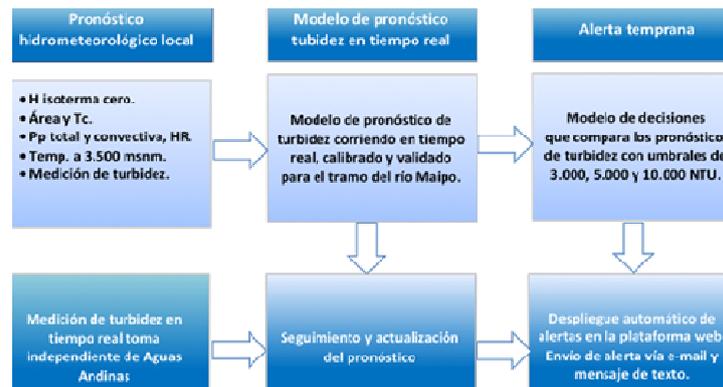


Figura 1. Esquema de funcionamiento del módulo de pronóstico operacional de turbiedad

- a. Modelo de turbiedad: ocupando datos hidroclimatológicos observados (caudales, precipitación y temperatura) y de turbiedad observada diaria, se calibró y validó un Modelo de predicción para simular las turbiedades históricas (flechas naranjas) buscando ser capaz de representar las características de la serie temporal, para así poder caracterizar los eventos en función de su umbral y duración.
- b. Modelos atmosférico e hidrológico: ocupando datos hidroclimatológicos observados (caudales, precipitación y temperatura) se realizaron dos actividades (flechas blancas): 1) validación de las series climáticas generadas por el Modelo atmosférico y 2) calibración y validación de los caudales históricos del Modelo hidrológico.
- c. Simulación de turbiedad: Se realizó un procedimiento de validación de caudales y turbiedades históricas, pero considerando como únicas forzantes las series climáticas generadas por el Modelo atmosférico (flechas azules). Con

- las series climatológicas del Modelo atmosférico se obtienen series de caudales del Modelo hidrológico que se validan con los datos históricos. Para terminar esta etapa, se ingresan las series hidroclimatológicas simuladas anteriores en el modelo de predicción de turbiedad para validar sus resultados en base a (1) los datos históricos y (2) los datos sintéticos de turbiedad entregados por el modelo en base a datos históricos (actividad a)). Esta validación está centrada en un análisis de frecuencia e intensidad de los eventos de turbiedad.
- d. Escenarios futuros: Luego de haber calibrado los 3 modelos (atmosférico, hidrológico y de turbiedad), se hicieron proyecciones de series hidroclimáticas para obtener caudales y turbiedades futuras asociadas a escenarios de Cambio Climático (flechas verdes). En base a estos resultados se estudian las ocurrencias de los eventos de turbiedad y su variación con respecto al periodo histórico.

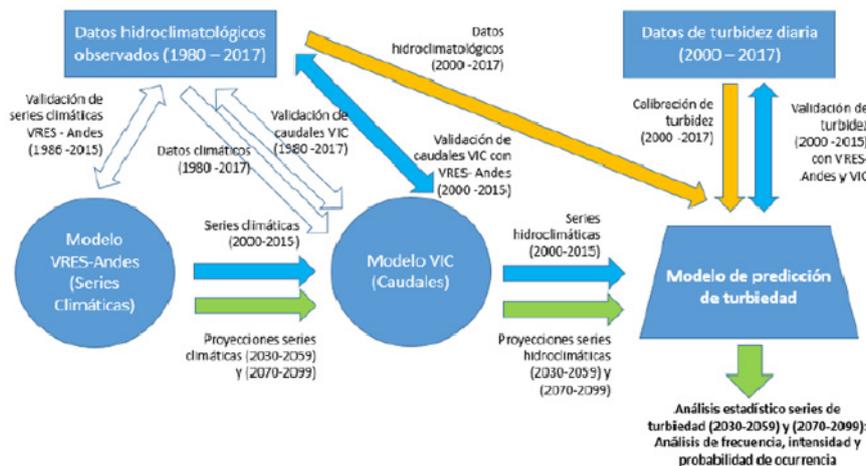


Figura 2. Metodología para la generación de series futuras de turbiedad

3. RESULTADOS

Diversas métricas mostraron en general un buen ajuste del modelo durante la etapa de calibración, en particular de los eventos de turbiedad extrema, tanto en sus valores promedios y máximos como en sus duraciones. La figura 3 muestra las comparaciones de turbiedad máxima pronosticada y desviación estándar de la turbiedad horaria para los próximos 3 días. Es importante destacar que el pronóstico de la duración del evento es en ocasiones incluso más importante que el valor máximo alcanzado, pues una vez declarado el evento y eventualmente cerrada la captación, es fundamental estimar cuándo la turbiedad volverá a sus valores usuales y permitirá retomar la captación normal desde el río nuevamente. Las figuras 4 y 5 también muestran un buen ajuste en cuanto a este parámetro. Desde su puesta en marcha, el modelo de pronóstico acumula 9 meses de

operación (oct/18 a jun/19). Respecto del periodo de calibración inicial, cuyo ajuste se realizó con reanálisis meteorológico, durante el periodo de operación se ha observado una baja en el desempeño (ver Figura 6), atribuida principalmente al error asociado en el pronóstico meteorológico a 3 días. No obstante, en general los errores siguen siendo bajos. Para todo el periodo de operación, se obtienen errores cuadráticos medios (RMS) normalizados por el promedio máximo de 12.4% y medio de 10.0%. Existe la intención de revisar el modelo al menos en forma anual, incorporando toda la información generada de la comparación entre las series de turbiedades observadas y las pronosticadas, para decidir si es necesario algún ajuste de sus parámetros para mejorar su desempeño.

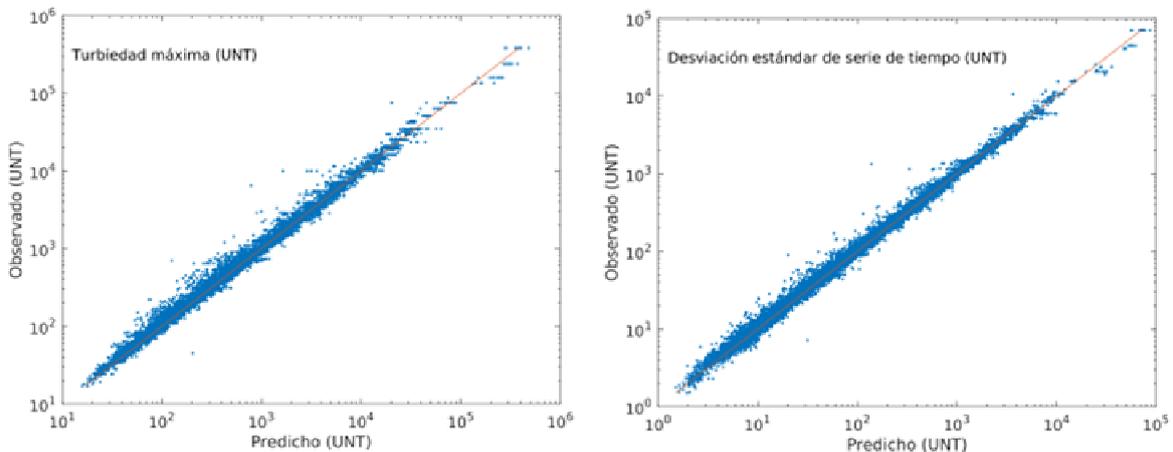


Figura 3. Comparación entre valores pronosticados (eje x) y observados (eje y). Turbiedad máxima (izq) y desviación estándar (der) para los próximos 3 días.

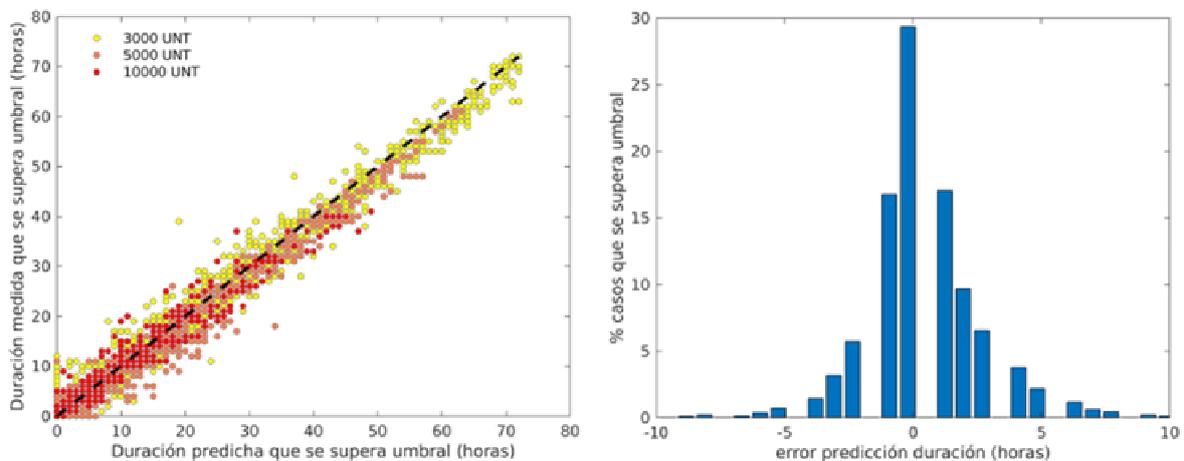


Figura 4. Comparación entre valores pronosticados (eje x) y observados (eje y) para la duración de eventos que superan umbrales (izq). Histograma del error en el pronóstico de la duración de eventos que superan umbrales (der).

Es importante mencionar que los modelos de inteligencia artificial no permiten explicar en profundidad los mecanismos físicos involucrados en los procesos de escorrentía y calidad de aguas de los ríos. Sin embargo, en el contexto de un sistema de alerta temprana, en donde lo que se busca es dar una advertencia precisa para eventos extremos, se da mayor importancia a la simplicidad y robustez del

modelo de pronóstico, que a la descripción precisa de los diferentes subprocesos internos que explican el evento. En este estudio se buscó evaluar una metodología para la caracterización y predicción de los eventos futuros de turbiedad, tomando en cuenta los patrones de cambio climático que pueden ocurrir sobre la cuenca del Maipo.

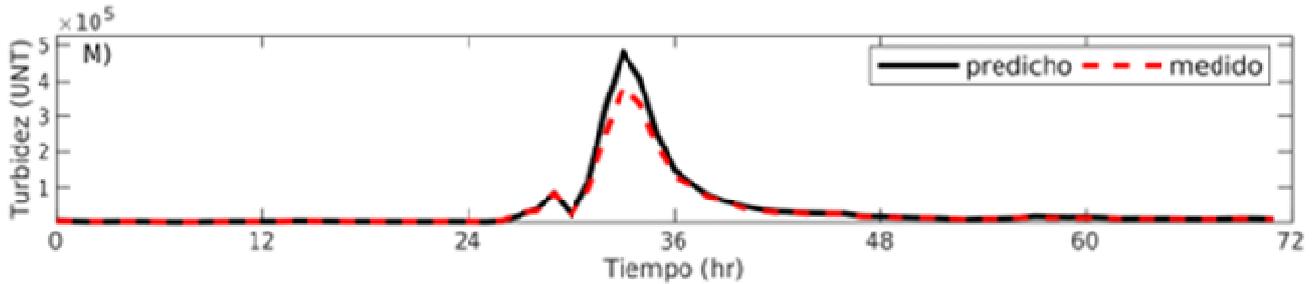


Figura 5. Serie de tiempo de comparación de turbiedad horaria observada y pronosticada para evento extremo

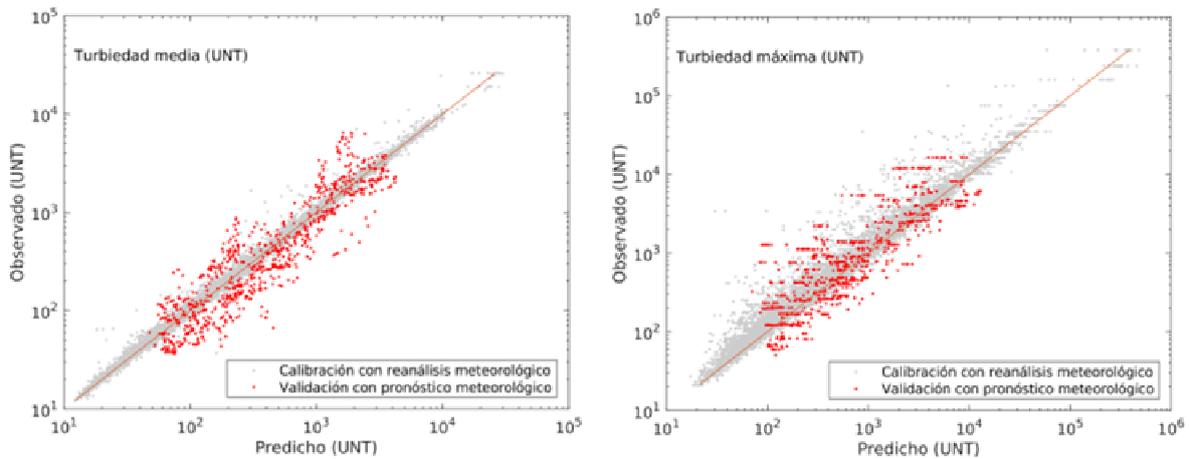


Figura 6. Comparación del pronóstico de turbiedad media (izq) y máxima (der) para los próximos 3 días y los datos medidos desde la puesta en marcha de la plataforma (puntos rojos). Como referencia se muestran en gris el pronóstico de la calibración.

3.1 Validación Histórica

A continuación, se muestran los resultados del proceso de validación de los modelos utilizados, comparando sus resultados con los valores históricos observados. Esto equivale a las actividades a), b) y c) descritas en el punto 4.1 y figura 6 anteriores (flechas naranjas, blancas y azules).

3.2 Modelo Climático

Para este estudio se tuvo acceso al proyecto VRES-Andes (Centro de Cambio Global en conjunto con el Lawrence Berkeley National Laboratory, el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el Massachusetts Institute of Technology, y la Universidad de California Davis) el cual realizó una

modelación de alta resolución (~14 Km) en la región de los Andes Sudamericanos.

El modelo climático VRES-Andes simuló correctamente los patrones de precipitación y temperatura, aunque debió ser corregido mediante una técnica estadística de post-procesamiento para la

remoción de sesgo con objeto de representar las condiciones del clima local (ver figura 7). El análisis de los resultados permitió concluir que el modelo climático VRES-Andes es una herramienta válida para la modelación de las condiciones de clima futuro.

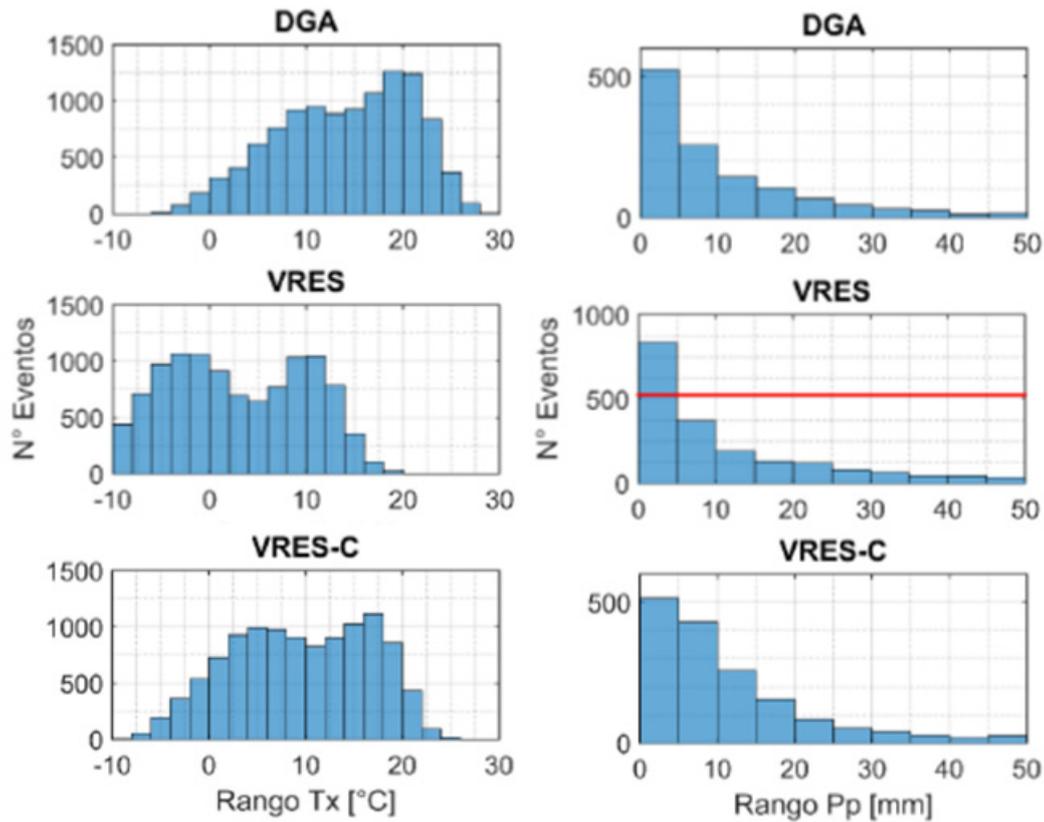


Figura 7. Comparación de histogramas base de temperatura máxima (izq) y precipitación anual (der) entre las observaciones DGA y las simulaciones del modelo VRES-Andes (VRES) y VRES-Andes corregido (VRES-C)

3.3 Modelo Hidrológico

La modelación hidrológica se realizó mediante el modelo hidrológico “Variable Infiltration Capacity” (VIC). Se trata de un modelo distribuido de base física que representa procesos de evapotranspiración, interceptación, infiltración, acumulación y derretimiento de nieve, etc.

El modelo VIC se ha implementado y calibrado en la totalidad de la cuenca del Río Maipo como parte del trabajo de actualización del Balance Hidrológico

(DGA, 2017). Debido a que el presente estudio considera solamente la cuenca alta del Maipo, se calibró sólo la estación fluviométrica DGA Río Maipo en El Manzano.

Al correr el modelo VIC con las forzantes VRES-Andes corregidas según la remoción de sesgo, se logran captar las propiedades básicas del régimen hidrológico nival del río, aunque de igual forma se observan sesgos que pueden removerse estadísticamente, como muestra la figura 8 siguiente.

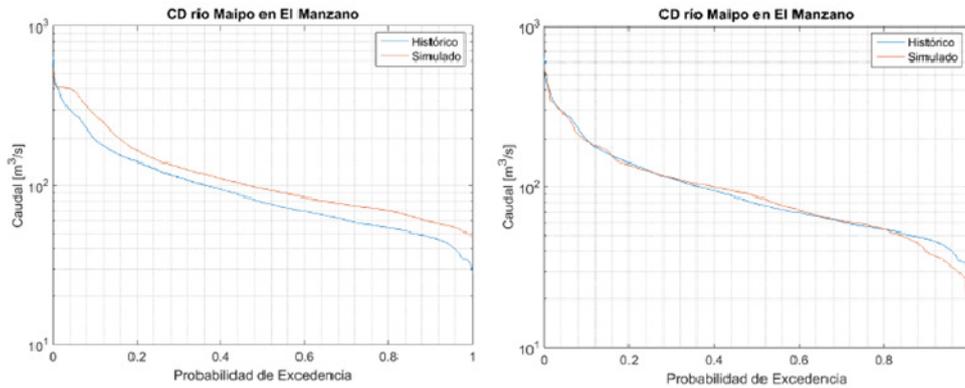


Figura 8. Curva de duración de caudales del río Maipo en El Manzano con forzantes VRES-Andes sin remoción de sesgo (izq) y con remoción de sesgo (der)

3.4 Modelo De Turbiedad

El registro temporal de turbiedad se analiza en base a una teoría de sucesiones, es decir, la serie se define como un registro temporal que comparte la característica de superar un cierto umbral. En base a este umbral, los eventos se pueden caracterizar en duración, intensidad máxima y magnitud, como se señala en la figura 9. El análisis realizado considera una escala diaria, tanto en sus datos de entrada como en sus resultados. Para la predicción de turbiedad en el río Maipo se ocupó un esquema tipo Autoregresivo No-lineal con input externos (NARX), dada la habilidad que poseen las redes neuronales para resolver problemas no-lineales sin tener la necesidad de comprender e identificar todos los procesos físicos involucrados. Para caracterizar los eventos que entrega el modelo de turbiedad, se comparan estadísticamente los resultados con los datos observados, ya que el modelo no tiene como finalidad predecir a escala diaria, sino más bien ser capaz de reproducir los comportamientos generales a escalas temporales mayores.

Estas comparaciones son:

- Identificación del número total de eventos sobre el umbral.
- Comparación de las duraciones, intensidad máxima y magnitud: se considera el total de los eventos simulados, por lo que se obtiene un valor mínimo, medio y máximo para cada una de las tres propiedades antes mencionada.
- Identificación de los valores máximos de intensidad mensuales.

Se observó una satisfactoria representación del comportamiento de turbiedad al evaluar el desempeño del modelo con forzantes históricas (DGA), no obstante, al evaluar el desempeño con forzantes VRES, se observó un considerable aumento en la duración de los eventos de turbiedad, probablemente debido a un “overfitting” de la red neuronal, lo que causa que en la serie temporal se quede fija en un valor relativamente constante.

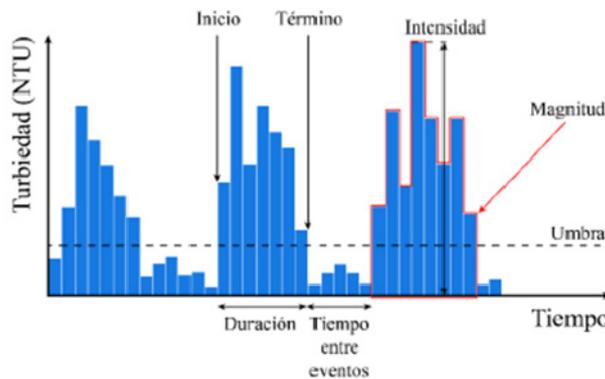


Figura 9. Esquema gráfico de las propiedades de los eventos de turbiedad

Tabla 1. Resultados para turbiedad simulados con base histórica DGA y forzantes VRES-Andes, para el periodo 2001-2015

Registro / Forzantes ¹	Eventos turbiedad	Duración [días]			Intensidad Máxima [NTU]			Magnitud [NTUxdía]		
		Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo
OBS	45	1	1	14	3.090	4.952	78.172	3.090	7.236	104.816
DGA	27	1	1	15	3.045	4.837	22.580	3.045	10.511	97.770
VRES	29	1	2	44	4.053	4.605	33.340	4.053	10.676	822.981

1OBS: Periodo histórico registrado de eventos de turbiedad. DGA: Eventos de turbiedad simulados en base a registros históricos DGA. VRES: Eventos de turbiedad simulados en base al modelo atmosférico VRES y el modelo VIC.

3.5 Escenarios Futuros

3.5.1 Clima

En primer lugar se analizó el cambio en las variables meteorológicas de temperatura y precipitación para dos periodos futuros: uno cercano, correspondiente a los años 2030-2059, y un período futuro lejano, correspondiente a los años 2070-2099. Para esto, se aplicó un proceso de corrección de sesgo sobre los datos históricos que ya fue explicado anteriormente, para luego corregir los datos futuros de tal forma que posean la misma varianza y diferencia con respecto a los datos históricos originales. Al comparar el periodo histórico (1986-2015) con el futuro (2070-2099) bajo escenario de Cambio Climático RCP 8.5 (Figura 10), se observa para la cuenca Maipo Alto un aumento en las temperaturas máxima (+4.8 °C) y mínima (+4.9 °C) y una disminución leve de la precipitación (-0.6 mm). Considerando que estas dos variables influyen considerablemente el patrón de caudales y de turbiedad, estos resultados apuntan en la dirección de que en el cambio climático debiese afectar de manera importante los eventos de turbiedad.

3.5.2 Hidrología

Respecto de la hidrología, se observa una disminución acentuada en la escorrentía promedio estival (-44.4 m³/s) acompañada de un aumento del caudal invernal (+16.4 m³/s), la que no alcanza para compensar, provocando una disminución en la escorrentía promedio total anual de -19% equivalente a -22.3 m³/s (figura 11).

3.5.3 Turbiedad

Se simularon las series de turbiedad futuras en base a las forzantes meteorológicas (VRES-Andes), como también los caudales obtenidos a partir de estas mismas (VIC). Es preciso recalcar que todas estas series poseen una remoción de sesgo mediante los procedimientos señalados en los puntos anteriores. Se analizaron las propiedades esperadas para los eventos de turbiedad futuros. Respecto de la actualidad, se esperarían incrementos en el número de eventos, en la duración máxima y magnitud media asociada y aparentes reducciones en las intensidades máximas de los mismos.

Tabla 2. Resultados para turbiedad para periodos históricos y futuro

Registro / Forzantes	Eventos turbiedad	Duración [días]			Intensidad Máxima [NTU]			Magnitud [NTUxdía]		
		Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo	Mínimo	Mediana	Máximo
VRES Historico ¹	31	1	2	44	3.035	4.981	78.172	3.007	7.236	822.981
VRES 2070 ²	100	1	2	82	3.010	4.122	24.008	3.010	10.400	675.095

1VRES Histórico: Eventos simulados en base a modelos atmosférico VRES e hidrológico VIC, años 1986-2015.

2VRES 2070: Eventos simulados en base a los modelos atmosférico VRES e hidrológico VIC, años 2070-2099.

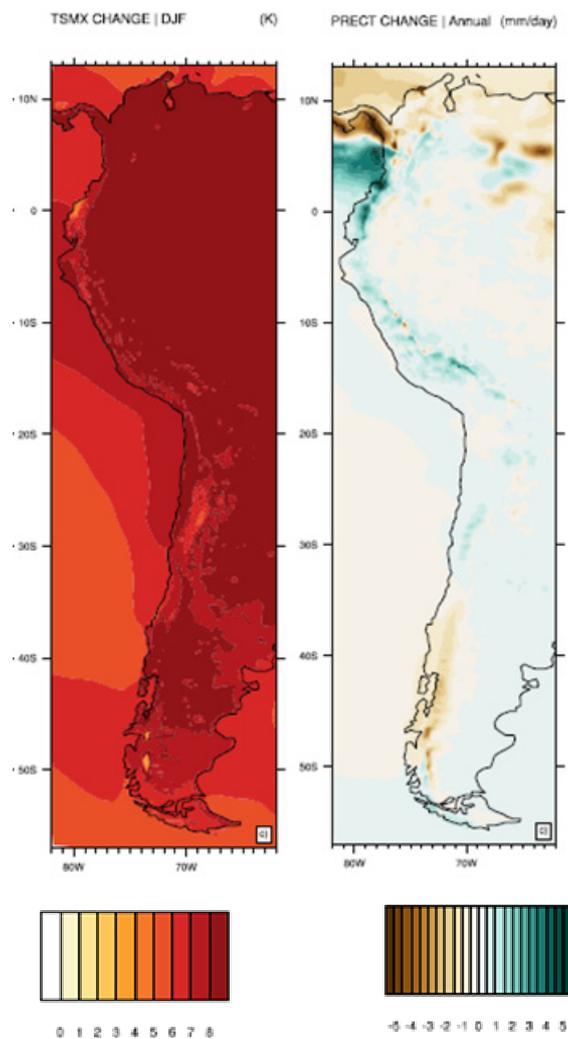


Figura 10. Cambios en la temperatura (K) promedio máxima diaria (izq) y cambios en la precipitación (mm/día) anual promedio (der) entre los periodos histórico (1985 – 2015) y futuro (2070 – 2100).

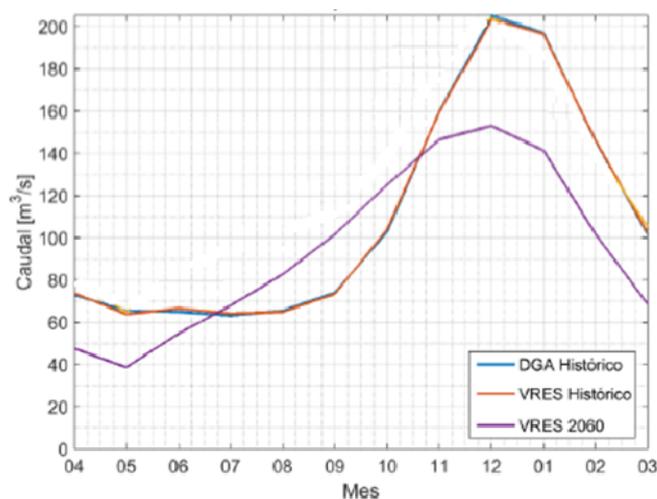


Figura 11 Curvas de Variación Estacional para el río Maipo en El Manzano, periodo histórico (1985 – 2015) y futuro (2070 – 2100) con forzantes VRES

4. CONCLUSIONES

A través de estudios anteriores se ha podido comprobar que el fenómeno de la alta turbiedad si bien tiene ciertas relaciones con variables hidrometeorológicas usuales, tales relaciones no son lineales ni tampoco estrictas, lo que dificulta enormemente su predicción.

No es de extrañar entonces que en ambos casos presentados en este documento se hayan incorporado redes neuronales como aproximación para predecir turbiedades en función de pronósticos meteorológicos y simulaciones climáticas.

Además de lo anterior, ambos enfoques deben asumir las incertezas previas de los modelos hidrometeorológicos que les sirven de forzantes para la predicción de la turbiedad, lo que implica mermas adicionales en sus desempeños predictivos.

No obstante, ambas metodologías se consideran promisorias alternativas para abordar el desafío de intentar predecir el comportamiento del fenómeno de la turbiedad, tanto en el corto como en el largo plazo, las cuales es necesario seguir evaluando y desarrollando.

REFERENCIAS

Estudio del fenómeno de turbiedad en el río Maipo, DICTUC S.A., 2018

Modelo de Pronóstico Operacional de la Turbidez en el Río Maipo en Toma Independiente, Modelación Ambiental SpA, 2018

Evaluación de escenarios futuros asociados al fenómeno de turbiedad en río Maipo, DICTUC S.A., 2018

Como citar este artículo:

Poblete C., et al. (2020). Avances en el pronóstico operacional de corto plazo y la evolución futura de largo plazo del fenómeno de la turbiedad en el río Maipo. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 37-46. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Análisis de Frecuencias de Crecientes No Estacionario con una y dos Covariables

Non-stationary Flood Frequency Analysis with one and two Covariates

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

Daniel Francisco Campos Aranda ^{1*}

Recibido: 27/04/2020

Aceptado: 26/08/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

Muchos registros de gasto máximo anual (crecientes) muestran una tendencia ascendente originada por la urbanización ocurrida en su cuenca. En otros la tendencia es descendente y se produce por la construcción de embalses en la cuenca. En ambos casos, los efectos del cambio climático pueden exacerbar tales tendencias. El análisis de frecuencias de crecientes permite estimar las Crecientes de Diseño, asociadas a bajas probabilidades de excedencia. Esta técnica, en registros que no son estacionarios, se puede realizar con base en varias funciones de distribución de probabilidades (FDP) variando linealmente su parámetro de ubicación (u) con una o dos covariables y entonces, sus cuatro y cinco parámetros de ajuste se pueden obtener por medio de la generalización del método de los momentos L. En este estudio se aplican las FDP: General de Valores Extremos, Logística Generalizada y Pareto Generalizada, a un registro de crecientes sin tendencia pero no estacionario, usando como covariable un índice climático global y a otro registro de crecientes con tendencia ascendente, empleando como covariables el tiempo y dos índices de la cuenca, uno relacionado con las lluvias máximas anuales y otro con la extensión del área urbana. Las conclusiones destacan la sencillez y utilidad del método expuesto.

Palabras clave: momentos L, distribuciones GVE, LOG y PAG no estacionarias, error estándar de ajuste, Oscilación Interdecadal del Pacífico, Predicción de PMD, extensión del área urbana.

Abstract

Many records of maximum annual flows (floods) show an upward trend caused by the urbanization developing on its watershed, whereas for other records the trend is downwards due to the construction of reservoirs in the watershed. In both cases, the effects of climate change can exacerbate such trends. Flood frequency analysis allows the estimation of Design Floods, associated with low probabilities of exceedance. This technique, in non-stationary records, can be performed based on several probability distribution functions (PDF); varying linearly its location parameter (u), with one or two covariates, its four and five fit parameters can be obtained by means of the generalization of the L moments method. In this study, the PDFs: General of Extreme Values, Generalized Logistics and Generalized Pareto, are applied to a record of floods without trend but not stationary, using as covariate a global climate index. The same PDFs are used on another record of floods with upward trend, using as covariates the time and two indices of the watershed, one related to the annual maximum rains and the other with the extension of the urban area. The conclusions highlight the simplicity and usefulness of the exposed method.

Keywords: L moments, non-stationary GEV, GLO and GPA distributions, standard error of fit, Pacific Interdecadal Oscillation, Prediction of MDP, urban area extension.

¹ Profesor Jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. campos_aranda@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Las obras hidráulicas pueden ser de aprovechamiento como embalses y presas derivadoras, o bien de control para brindar protección a otra infraestructura o a la sociedad, como diques de protección, presas rompe-picos, encauzamientos, rectificaciones, puentes y drenaje pluvial urbano. Todas las obras hidráulicas requieren en sus etapas de planeación, diseño y operación de la estimación, lo más exacta posible, de sus *Crecientes de Diseño*. Con base en estas estimaciones hidrológicas, se dimensionan hidrológicamente las obras hidráulicas y se garantiza su seguridad, también hidrológica; por ello, las crecientes de diseño son *predicciones* o gastos máximos asociados a bajas probabilidades de excedencia, que se obtienen a través del *Análisis de Frecuencias de Crecientes* (AFC). Además, las obras hidráulicas se deben revisar, cuando ocurre alguna de estas dos condiciones: (1) se dispone de más información hidrométrica o hidrológica; o bien, (2) han ocurrido cambios en su cuenca, sean estos de uso del suelo, de construcción de otras obras hidráulicas o los originados por el cambio climático (Jakob, 2013).

El AFC es una técnica estadística de inferencia, que utiliza un modelo probabilístico o *función de distribución de probabilidades* (FDP), para representar a la muestra disponible de gastos máximos anuales en el sitio del proyecto. El AFC está basado en la suposición de *estacionariedad*, es decir, de un clima que no cambia con el tiempo en el sentido estadístico y por ello, se acepta que los registros disponibles de gasto máximo anual sean independientes y estén idénticamente distribuidos, condición denominada “*iid*” (Rao & Hamed, 2000; Meylan *et al.*, 2012). Sin embargo, en años recientes se ha venido comprobando el cambio climático global, el cual ha generado una intensificación del ciclo hidrológico, con incrementos en la frecuencia y magnitud de los eventos extremos de precipitación y por consecuencia, en la posibilidad de crecientes más severas (Katz, 2013; Kim *et al.*, 2015; Álvarez-Olguín & Escalante-Sandoval, 2016).

La extensión de la teoría estadística de valores extremos al caso de registros hidrológicos no estacionarios ha seguido varios enfoques descritos por Khaliq *et al.* (2006). Uno de ellos, quizás el más simple, aplica la FDP clásica de esta teoría, la distribución General de Valores Extremos (GVE) con tres parámetros (u , a , k), permitiendo un ajuste o traslado gradual al introducir el tiempo t como una

covariable en su parámetro de ubicación u , conservando constantes el de escala a y el de forma k (Park *et al.*, 2011; Katz, 2013).

Varios autores, han establecido una nomenclatura para estas FDP no estacionarias, por ejemplo El Adlouni *et al.* (2007) y Aissaoui-Fqayeh *et al.* (2009) definieron la distribución GVE estacionaria como GVE_0 , la que tiene su parámetro de ubicación variable linealmente con el tiempo ($u = \delta_1 + \delta_2 \cdot t$) como GVE_1 y cuando la variación depende de dos covariables ($u = \delta_1 + \delta_2 \cdot t + \delta_3 \cdot h$) será GVE_2 . En el modelo GVE_{11} varían linealmente con el tiempo u otra covariable los parámetros de ubicación y de escala.

En los modelos GVE_1 y GVE_2 , en lugar de la covariable t se ha utilizado algún indicador de la variabilidad climática global, como la oscilación interdecenal del Pacífico (IPO) que representa el comportamiento suavizado de la oscilación decenal del Pacífico (PDO) y es similar a la anomalía más importante del clima global que se manifiesta en el océano Pacífico tropical y se conoce como ENSO (El Niño Southern Oscillation). La PDO (Pacific decadal oscillation) se manifiesta en el norte del océano Pacífico y varía en escalas de tiempo mucho más amplias de 20 a 30 años (Sheffield y Wood, 2011; Teegavarapu, 2012; Franks *et al.*, 2015). En México se han realizado estudios de AFC no estacionario utilizando como covariable el ENSO por López de la Cruz y Francés (2014) y usando la PDO por Álvarez-Olguín y Escalante-Sandoval (2016).

El *objetivo* de este estudio consistió en exponer con detalle la generalización del método de los momentos L para estimar los parámetros de ajuste de las FDP no estacionarias GVE_1 y GVE_2 , que fue propuesto, aplicado y contrastado por El Adlouni & Ouarda (2008). En este trabajo se usan como covariables la IPO, el tiempo t y dos índices, uno relacionado con el desarrollo urbano en la cuenca y otro con la precipitación máxima diaria anual ocurrida en ella. Además, se amplió tal procedimiento a las FDP Logística Generalizada (LOG) y Pareto Generalizada (PAG), que son modelos de uso amplio en el análisis de frecuencias de datos hidrológicos extremos (Kim *et al.*, 2015; Campos-Aranda, 2019). Se describen dos aplicaciones numéricas con datos procedentes de la literatura especializada y se destaca la sencillez y utilidad del método de los momentos L para el ajuste de las seis FDP no estacionarias expuestas.

2. TEORÍA OPERATIVA Y DATOS PROCESADOS

2.1. Momentos L poblacionales y de la muestra

Los momentos L (λ_r) son un sistema alternativo y reciente que permite estimar los parámetros de ajuste de las FDP, de manera exacta y confiable. Su nombre

proviene de ser combinaciones lineales de los momentos de probabilidad pesada (β_r) desarrollados por Greenwood *et al.* (1979). Los β_r mejoran sustancialmente las propiedades del muestreo, al no ser influenciados por los valores dispersos (Asquith, 2011). Los momentos L se definen de la manera siguiente (Hosking & Wallis, 1997):

$$\lambda_1 = \beta_0 \tag{1}$$

$$\lambda_2 = 2 \cdot \beta_1 - \beta_0 \tag{2}$$

$$\lambda_3 = 6 \cdot \beta_2 - 6 \cdot \beta_1 + \beta_0 \tag{3}$$

$$\lambda_4 = 20 \cdot \beta_3 - 30 \cdot \beta_2 + 12 \cdot \beta_1 - \beta_0 \tag{4}$$

También se establecen los cocientes (τ) de momentos L, iniciando con L-Cv que es análogo a este

coeficiente y después los de similitud con los coeficientes de asimetría y de curtosis, que son:

$$\tau_2 = \lambda_2 / \lambda_1 \tag{5}$$

$$\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2 \tag{6}$$

$$\tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2 \tag{7}$$

En una muestra de tamaño n , con sus elementos en orden ascendente ($x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$) los estimadores insesgados de β_r son estimados con la

ecuación siguiente (Stedinger *et al.*, 1993; Hosking & Wallis, 1997):

$$b_r = \frac{1}{n} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2) \dots (j-r)}{(n-1)(n-2) \dots (n-r)} x_j \tag{8}$$

Los estimadores muestrales de λ_r serán l_r estando definidos por las ecuaciones 1 a 4 y los de los cocientes de momentos L serán t_2, t_3 y t_4 , según las ecuaciones 5 a 7.

Estas tres FDP también coinciden en tener un límite superior cuando $k > 0$ y en definir funciones de dos parámetros de ajuste conocidas como Gumbel, Logística y Exponencial, cuando $k = 0$.

2.2. Ajuste con momentos L de las distribuciones GVE₀, LOG₀ y PAG₀

Hosking & Wallis (1997) destacaron en su Tabla 5.1, que estas tres FDP, cuando su parámetro de forma es negativo ($k < 0$), tienen sus colas derechas más densas o gruesas que todas las otras FDP comúnmente utilizadas en los AFC; debido a ello han ganado aceptación en los análisis de frecuencia de datos hidrológicos extremos (El Adlouni *et al.* 2008).

A continuación se citan para las distribuciones GVE, LOG y PAG *estacionarias* su solución inversa $x(F)$, con la cual se obtienen las predicciones que se asocian a una cierta probabilidad de no excedencia (F) y las ecuaciones del método de momentos L que permiten estimar sus tres parámetros de ajuste (u, a, k) correspondientes a la ubicación, escala y forma.

Distribución GVE (Hosking & Wallis, 1997): intervalo de $x: u + a/k \leq x < \infty$ si $k < 0$;

$$-\infty < x < \infty \text{ si } k = 0; -\infty < x \leq u + a/k \text{ si } k > 0.$$

$$x(F) = u + \frac{a}{k} \{1 - [-\ln(F)]^k\} \quad ; \quad k \neq 0 \quad (9)$$

$$k \cong 7.8590 \cdot c + 2.9554 \cdot c^2 \quad (10)$$

siendo

$$c = \frac{2}{3 + t_3} - 0.63093 \quad (11)$$

$$a = \frac{l_2 \cdot k}{\Gamma(1 + k) \cdot (1 - 2^{-k})} \quad (12)$$

$$u = l_1 - \frac{a}{k} [1 - \Gamma(1 + k)] \quad (13)$$

Para la evaluación de la función Gamma se utilizó la fórmula de Stirling (Davis, 1972):

$$\Gamma(\varepsilon) \cong e^{-\varepsilon} \cdot \varepsilon^{\varepsilon-1/2} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \left(1 + \frac{1}{12 \cdot \varepsilon} + \frac{1}{288 \cdot \varepsilon^2} - \frac{139}{51840 \cdot \varepsilon^3} - \frac{571}{2488320 \cdot \varepsilon^4} + \dots\right) \quad (14)$$

Distribución LOG (Hosking & Wallis, 1997):
intervalo de x , idéntico al de la GVE.

$$x(F) = u + \frac{a}{k} \left\{1 - \left[\frac{(1-F)}{F}\right]^k\right\} \quad ; \quad k \neq 0 \quad (15)$$

$$k = -t_3 \quad (16)$$

$$a = \frac{l_2 \cdot \text{sen}(\pi \cdot k)}{\pi \cdot k} \quad (17)$$

$$u = l_1 - a \left[\frac{1}{k} - \frac{\pi}{\text{sen}(\pi \cdot k)} \right] \quad (18)$$

Distribución PAG (Hosking & Wallis, 1997): $u \leq x \leq u + a/k$ si $k > 0$.
intervalo de x : $u \leq x < \infty$ si $k \leq 0$;

$$x(F) = u + \frac{a}{k} [1 - (1 - F)^k] \quad ; \quad k \neq 0 \quad (19)$$

$$k = \frac{1 - 3 t_3}{1 + t_3} \quad (20)$$

$$a = l_2(1 + k) \cdot (2 + k) \quad (21)$$

$$u = l_1 - l_2(2 + k) \quad (22)$$

2.3. Ajuste con momentos L de las distribuciones GVE₁ y GVE₂

La generalización del método de momentos L propuesta por El Adlouni & Ouarda (2008) para el

ajuste de la FDP no estacionaria tipo GVE₁, comienza en la expresión del valor esperado de X y en ella hacer variar el parámetro de ubicación con la covariable t :

$$E[X] = u_t + \frac{a}{k} [1 - \Gamma(1 + k)] = \delta_1 + \delta_2 \cdot t + \frac{a}{k} [1 - \Gamma(1 + k)] \quad (23)$$

De esta ecuación se deduce que un estimador $\hat{\delta}_2$ de δ_2 se puede obtener mediante una regresión lineal

simple entre la variable X y la covariable t . Después se define una nueva variable S_1 con la expresión:

$$S_1 = X - \delta_2 \cdot t \quad (24)$$

Se deduce de la ecuación 23, que la nueva variable S_1 se distribuye según una FDP tipo GVE₀ con parámetros δ_1 , a y k que se estiman con las ecuaciones 10 a 13 del método de momentos L, destacando que u (ecuación 13) es igual a δ_1 , con lo cual quedan estimados los cuatro parámetros de ajuste del modelo GVE₁. La ecuación 24 corresponde a uno de los primeros enfoques simples sugeridos para procesar registros hidrológicos con tendencia, consistente en retirar primero tal componente determinística (McCuen & Thomas, 1990; Campos-Aranda, 2012). Como han indicado Mudersbach & Jensen (2010), tal enfoque es práctico pero los

resultados de su AFC son válidos sólo en el presente y las obras hidráulicas deben ser seguras al término de su vida útil, requiriéndose que la creciente de diseño sea estimada en una fecha futura predeterminada.

El mismo enfoque se utiliza para introducir una dependencia de dos covariables (t , h) en el parámetro de ubicación u , por lo cual, las estimaciones $\hat{\delta}_2$ y $\hat{\delta}_3$ de δ_2 y δ_3 se obtienen mediante una regresión lineal múltiple de la variable X contra t y h . La nueva variable S_2 será:

$$S_2 = X - \delta_2 \cdot t - \delta_3 \cdot h \quad (25)$$

Con las ecuaciones 10 a 13 aplicadas a la muestra de datos corregidos S_2 se definen los parámetros restantes k , a y δ_1 del modelo GVE₂. El Adlouni & Ouarda (2008) compararon por simulación numérica tres procedimientos de obtención de los cuatro parámetros de ajuste del modelo GVE₁: el método de máxima verosimilitud (Coles, 2001; Nadarajah, 2005; Katz, 2013), el de máxima verosimilitud generalizada (Martins & Stedinger, 2000; El Adlouni *et al.*, 2007) y su generalización del de momentos L; concluyen que el último es mejor que el primero, por tener menores sesgo y error medio cuadrático, pero no

supera al segundo, sobre todo en registros con asimetría importante.

2.4. Ecuaciones de la regresión lineal

Se considera que las ordenadas (y) son los datos anuales hidrológicos X_i y los tiempos o años t_i son las abscisas (x), en este caso iguales al i -ésimo valor i . Para probar si la pendiente (δ_2) de la recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados de los residuos, es estadísticamente diferente de cero, se usa una prueba basada en la distribución de Student con estadística DS , definida por las ecuaciones siguientes (Ostle & Mensing, 1975):

$$X_i = \delta_1 + \delta_2 \cdot t_i \quad (26)$$

$$\delta_1 = \bar{X} - \delta_2 \cdot \bar{t} \quad (27)$$

$$\delta_2 = \frac{\text{Cov}(X, t)}{\text{Var}(t)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \cdot i - \bar{X} \cdot \bar{t}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i^2 - \bar{t}^2} \quad (28)$$

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(X, t)}{\sqrt{\text{Var}(X) \cdot \text{Var}(t)}} \quad (29)$$

$$\text{Var}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2 \quad (30)$$

$$DS = \frac{\delta_2}{\sqrt{S_\delta^2}} \quad (31)$$

siendo

$$S_\delta^2 = \frac{S_E^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (32)$$

$$S_E^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{(n - 2)} \quad (33)$$

En las expresiones anteriores, \bar{X} y \bar{t} son las medias aritméticas y r_{xy} es el coeficiente de correlación lineal que varía de cero a ± 1 . La pendiente δ_2 tiene unidades de $X/\text{año}$ y la ordenada al origen b de X . En la ecuación 33, \hat{X}_i es el valor estimado con la ecuación 26. S_E^2 y S_δ^2 son las varianzas de los errores y de la pendiente. Si el valor absoluto calculado DS (ecuación 31) es mayor que el crítico DS_c , obtenido

para la distribución de Student con $v = n - 2$ grados de libertad y $\alpha = 5\%$, en una prueba de dos colas, la pendiente δ_2 es significativa, es decir, existe tendencia lineal. Para estimar el valor de DS_c se utiliza el algoritmo propuesto por Zelen & Severo (1972), con $Z = 1.95996$ para una confiabilidad $(1 - \alpha)$ del 95%:

$$DS_c = Z + G1/v + G2/v^2 + G3/v^3 + G4/v^4 \quad (34)$$

donde

$$G1 = (Z^3 + Z)/4$$

$$G2 = (5Z^5 + 16Z^3 + 3Z)/96$$

$$G3 = (3Z^7 + 19Z^5 + 17Z^3 - 15Z)/384$$

$$G4 = (79Z^9 + 776Z^7 + 1482Z^5 - 1920Z^3 - 945Z)/92160$$

2.5. Ecuaciones de la regresión lineal múltiple

La relación entre los datos $S_2 = Y_i$ y las dos covariables t_i y h_i es (Prosdocimi *et al.*, 2015):

$$Y = \delta_1 + \delta_2 \cdot t + \delta_3 \cdot h \quad (35)$$

cuyo arreglo matricial de sus *ecuaciones normales* es (Campos-Aranda, 2003):

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n h_i \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i \cdot h_i \\ \sum_{i=1}^n h_i & \sum_{i=1}^n t_i \cdot h_i & \sum_{i=1}^n h_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i \cdot h_i \end{bmatrix} \quad (36)$$

Con solución:

$$\mathbf{TH} \cdot \underline{\delta} = \mathbf{Y} \quad \therefore \quad \underline{\delta} = \mathbf{TH}^{-1} \cdot \mathbf{Y} \quad (37)$$

siendo, **TH** una matriz cuadrada con inversa \mathbf{TH}^{-1} , $\underline{\delta}$ un vector columna de incógnitas y **Y** otro vector columna de términos independientes. El coeficiente de determinación R^2 cuantifica el grado de

correlación de la regresión lineal múltiple, su numerador mide la mejora o reducción del error debido a la regresión y su denominador es la dispersión de la variable dependiente, es decir:

$$R^2 = \frac{Dy^2 - De^2}{Dy^2} \quad (38)$$

$$Dy^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (39)$$

$$De^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \delta_1 - \delta_2 \cdot t_i - \delta_3 \cdot h_i)^2 \quad (40)$$

Como De^2 siempre es menor que Dy^2 , entonces R^2 varía de cero a la unidad (cuando $De^2 = 0$) y su raíz cuadrada corresponde al coeficiente de correlación lineal múltiple.

2.6. Ajuste con momentos L de las distribuciones LOG_1 , LOG_2 , PAG_1 y PAG_2

Las distribuciones LOG y PAG son dos modelos probabilísticos utilizados regularmente en los análisis

de frecuencias de datos hidrológicos extremos y que resultan aplicables en sus versiones no estacionarias con parámetro de ubicación variable (u_t) por medio de la generalización del método de los momentos L, como se ha expuesto a partir de la ecuación 23. Esta ecuación clave del método tiene las expresiones siguientes en las distribuciones LOG y PAG (Rao & Hamed, 2000):

$$E[X] = u + \frac{\alpha}{k} [1 - \Gamma(1+k) \cdot \Gamma(1-k)] \quad (41)$$

$$E[X] = u + \frac{\alpha}{1+k} \quad (42)$$

2.7. Error estándar de ajuste

A mediados de la década de los años setenta se estableció al error estándar de ajuste (EEA) como un indicador estadístico cuantitativo, ya que evalúa la

desviación estándar de las diferencias entre los valores observados y los estimados con la FDP que se prueba; en este estudio los modelos: GVE_1 , GVE_2 , LOG_1 , LOG_2 , PAG_1 y PAG_2 . Su expresión es la siguiente (Kite, 1977):

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{n - np}} \quad (43)$$

en la cual, n y np son el número de datos de la muestra y de parámetros de ajuste, en este caso cuatro y cinco; X_i son los datos ordenados de menor a mayor y \hat{X}_i son los valores estimados con la solución

inversa $x(F)$ o función de cuantiles que utiliza el parámetro de ubicación variable, para una probabilidad de no excedencia estimada con la fórmula de Weibull (Benson, 1962):

$$P(X < x) = \frac{m}{n + 1} \quad (44)$$

donde,

m es el número de orden del dato, con 1 para el menor y n para el mayor.

2.8. Planteamiento general para los análisis probabilísticos

Ya sea que se utilice una o dos covariables, se estiman los cuatro o cinco parámetros de ajuste de las FDP no estacionarias y se cuantifica su EEA con la ecuación 43, para seleccionar la que conduce al menor valor de tal indicador. En este proceso, cuando los EEA son similares, se puede adoptar la FDP con base en juicios de seguridad hidrológica, es decir, la que reporta las predicciones más desfavorables o críticas, como se mostrará en las aplicaciones numéricas. Con base en las soluciones inversas (ecuaciones 9, 15 y 19) de las distribuciones GVE, LOG y PAG se calculan *predicciones* con periodos de retorno (Tr) de 2, 25, 50 y 100 años, a través del periodo de registro, aplicando variable el parámetro de ubicación u , con una o dos covariables. La primera predicción es la *mediana*, ya que su probabilidad de no excedencia (F) es del 50% y las tres siguientes se calculan para probabilidades complementarias, para definir su valor superior e inferior (Park *et al.*, 2011), es decir, para los valores siguientes: $F = 0.96$ y $F = 0.04$ para el Tr de 25 años; $F = 0.98$ y $F = 0.02$ para el Tr de 50 años y $F = 0.99$ y $F = 0.01$ para el Tr de 100 años. Las predicciones a futuro son posibles utilizando los valores pronosticados de cada covariable utilizada (Franks *et al.* 2015).

2.9. Registros de crecientes por procesar

Dos registros de la literatura especializada se seleccionaron para ilustrar la aplicación de las FDP no estacionarias GVE, LOG y PAG con el método de generalización de los momentos L (El Adlouni & Ouarda, 2008); sus valores se exponen en la tabla 1.

Estos registros tienen datos aproximados leídos en las gráficas donde fueron expuestos.

2.10. Crecientes en un Río de Australia

Franks *et al.* (2015) exponen un registro característico de un río del norte de Nueva Gales del Sur en Australia, cuyos datos abarcan 79 años en el periodo de 1920 a 1998. Tal registro se expone en la figura 1, se observa que el lapso de 1945 a 1973 hubo un incremento en la magnitud de las crecientes anuales, el cual corresponde al descenso y valores negativos de la oscilación interdecadal del Pacífico (IPO), mostrada en la figura 2.

2.11. Crecientes en una cuenca urbanizada en Inglaterra

Prosdocimi *et al.* (2014) consideran que usar $u = \delta_1 + \delta_2 \cdot t$ en una FDP, es un modelo no estacionario demasiado simple para representar el proceso de generación de los gastos máximos anuales, ya que algunos registros muestran mayor variabilidad en ciertos años, indicando con ello alguna influencia de factores climáticos. Por lo anterior, introducen como una covariable a la precipitación máxima diaria de periodo de retorno 100 años anual (PMD_{100}) en milímetros, ocurrida en la cuenca analizada. Prosdocimi *et al.* (2015) procesan los registros de gasto máximo anual de dos cuencas vecinas, una rural y otra con influencia de desarrollo urbano en el río Lostock. Esta última, tiene un registro de 33 datos en los años 1974 a 2006 y se sabe que su extensión del área urbana (EAU) pasó de un 6.3% en 1970, a los siguientes porcentajes: 10.2%, 11.3%, 12.2% y 16.4% en los años 1980, 1990, 2000 y 2010. En la

tabla 1 se citan los valores anuales de la PMD_{100} en su cuenca y en la Figura 3 se muestra tal registro de gastos, observando que tiene tendencia ligeramente

ascendente y variabilidad diferente en su primera mitad.

Tabla 1. Gastos máximos anuales (Q , en m^3/s) y sus covariables (IPO, PMD_{100} y EAU) en las dos estaciones hidrométricas procesadas.

No.	Río de Australia				Año	Cuenca urbanizada en U.K.		
	Q	IPO	Q	IPO		Q	PMD_{100}	EAU
1	289.4	-0.02	520.8	-0.19	1974	25.4	27.7	7.86
2	2314.8	0.03	428.2	-0.20	1975	26.3	25.1	8.25
3	810.2	0.25	2719.9	-0.21	1976	13.2	19.7	8.64
4	347.2	0.47	2546.3	-0.20	1977	19.0	19.4	9.03
5	289.4	0.74	532.4	-0.21	1978	22.7	20.3	9.42
6	925.9	1.10	1388.9	-0.23	1979	22.5	20.3	9.81
7	1157.4	1.21	2777.8	-0.30	1980	35.8	26.1	10.20
8	1134.3	1.33	2893.5	-0.44	1981	28.6	22.7	10.31
9	949.1	1.42	578.7	-0.60	1982	20.9	19.9	10.42
10	532.4	1.47	439.8	-0.83	1983	25.1	31.8	10.53
11	463.0	1.43	289.4	-1.13	1984	17.3	19.8	10.64
12	544.0	1.35	636.6	-1.36	1985	16.4	20.1	10.75
13	578.7	1.24	2025.5	-1.53	1986	41.2	24.9	10.86
14	1678.2	1.16	2800.9	-1.54	1987	20.2	24.9	10.97
15	694.4	1.18	983.8	-1.48	1988	17.5	20.2	11.08
16	486.1	1.25	686.1	-1.27	1989	16.2	18.9	11.19
17	1504.6	1.37	1122.7	-0.62	1990	17.8	17.1	11.30
18	1134.3	1.47	1504.6	-0.12	1991	23.4	20.9	11.39
19	1134.3	1.60	520.8	0.42	1992	23.0	17.8	11.48
20	1273.1	1.66	289.4	0.88	1993	16.2	19.9	11.57
21	173.6	1.68	1562.5	1.08	1994	21.6	23.3	11.66
22	231.5	1.49	1215.3	1.40	1995	21.9	15.9	11.75
23	289.4	1.09	694.4	1.51	1996	20.5	19.2	11.84
24	752.3	0.62	231.5	1.53	1997	23.8	21.8	11.93
25	1388.9	0.17	1794.0	1.47	1998	22.5	22.9	12.02
26	3935.2	-0.40	520.8	1.38	1999	28.1	23.1	12.11
27	1041.7	-0.62	196.8	1.29	2000	30.3	26.3	12.20
28	463.0	-0.96	231.5	1.22	2001	23.3	17.9	12.62
29	1620.4	-1.30	1678.2	1.08	2002	25.9	23.3	13.04
30	2430.6	-1.50	2199.1	1.05	2003	25.5	22.2	13.46
31	4919.0	-1.60	810.2	1.09	2004	26.2	19.1	13.88
32	463.0	-1.60	694.4	1.33	2005	31.0	17.3	14.30

33	1331.0	-1.55	173.6	1.50	2006	33.5	24.9	14.72
34	5613.4	-1.50	173.6	1.61	-	-	-	-
35	1122.7	-1.44	1273.1	1.63	-	-	-	-
36	1851.9	-1.25	520.8	1.55	-	-	-	-
37	405.1	-0.92	2604.2	1.32	-	-	-	-
38	231.5	-0.60	115.7	1.02	-	-	-	-
39	3761.6	-0.36	463.0	-0.02	-	-	-	-
40	810.2	-0.22	-	-	-	-	-	-

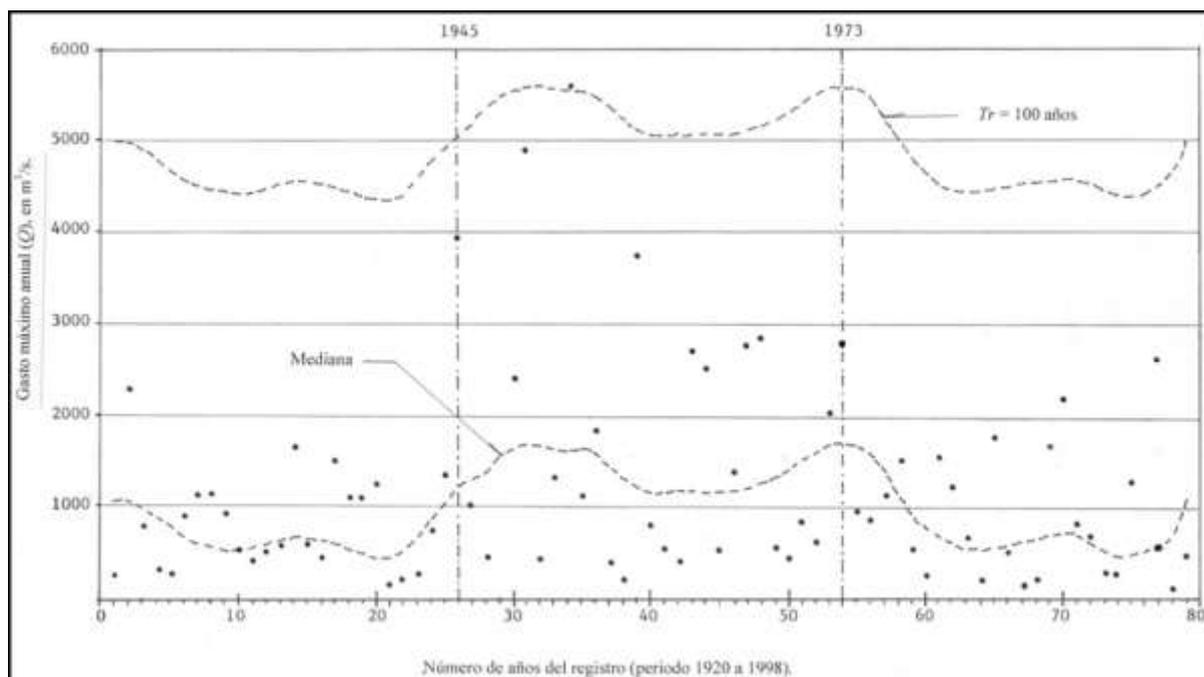


Figura 1. Gastos máximos anuales de un río del norte de Nueva Gales del Sur, Australia y sus predicciones de periodos de retorno 2 años (mediana) y 100 años, obtenidas con la FDP no estacionaria GVE_1 , usando como covariable la IPO.

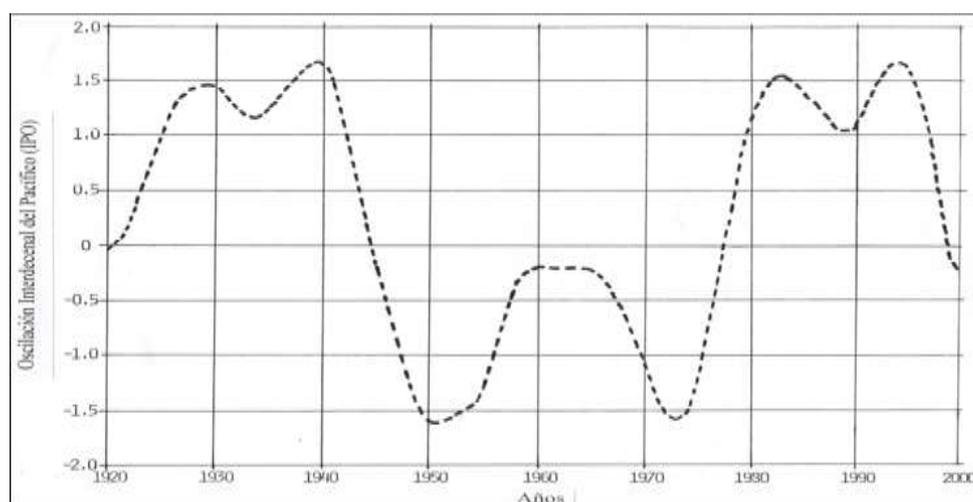


Figura 2. Variación de la Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO) según Franks *et al.* (2015)

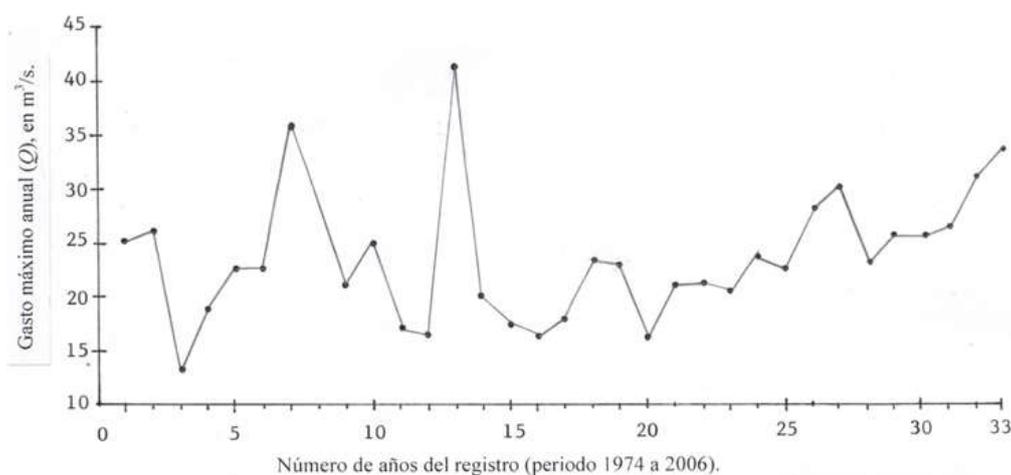


Figura 3. Gastos máximos anuales en una estación hidrométrica del Río Lostock, Inglaterra

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Crecientes en un Río de Australia

En esta aplicación numérica se usa como covariable la IPO, con tendencia lineal descendente y significativa, ya que $DS = -3.6242$ es mayor que $DSc = 1.9913$.

En este registro, el error estándar de ajuste (EEA) de las FDP no estacionarias GVE_1 , LOG_1 y PAG_1 resultaron ser 550.9, 566.8 y 549.9 m^3/s .

Aunque el modelo no estacionario PAG_1 tiene el menor EEA , se adoptan los resultados de la función GVE_1 por conducir a predicciones mayores o más críticas. Sus parámetros de ajuste son: $\delta_2 = -373.189$, $\delta_1 = 834.518$, $a = 679.619$ y $k = -0.118$; con -0.3817 como coeficiente de correlación lineal. En la Tabla 2 se presenta sólo una parte de las predicciones dentro de registro.

Para tener predicciones a futuro habrá que hacer pronósticos de los valores de la IPO (Franks *et al.* 2015).

En la figura 1 se muestran las dos predicciones extremas completas.

3.2. Crecientes en una cuenca urbanizada de Inglaterra

En las columnas 1 y 2 de la Tabla 3 se citan las tres FDP no estacionarias ajustadas a los datos de esta cuenca y sus respectivas covariables. Se observa que de los modelos tipo GVE_1 , sólo la covariable PMD_{100} tiene pendiente significativa, indicada en la columna 4 con el signo $>$; por lo anterior, únicamente estos resultados podrán ser comparados contra los del modelo tipo GVE_2 de dos covariables; cuyo mejor modelo es el último, el cual conduce al mayor valor de R^2 .

Para decidir entre ambos modelos, se recurre al menor EEA y por ello se selecciona la distribución GVE_1 con covariable PMD_{100} .

Respecto a la FDP Pareto Generalizada (PAG), sus EEA en los modelos seleccionados resultaron mayores.

En cambio, la FDP Logística Generalizada (LOG) conduce a EEA similares a los del modelo GVE y entonces pueden ser seleccionados sus resultados, al tomar en cuenta que sus predicciones son más críticas o severas. Por lo anterior, se adoptan como predicciones dentro del periodo histórico y con periodos de retorno (Tr) de 25, 50 y 100 años, las magnitudes de 43.0, 46.2 y 49.8 m^3/s , obtenidas con el modelo LOG_1 de covariable PMD_{100} .

Tabla 3. Contraste de parámetros de ajuste y de las predicciones obtenidas con las FDP no estacionarias aplicadas a los datos hidrológicos disponibles en una cuenca urbanizada de Inglaterra.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
FDP	Covariable	δ_2	DS	δ_3	r_{xy} o R^2	$\delta_1 = u$	a	k	EEA (m^3/s)	Mediana		Predicciones máximas (m^3/s)		
										mín	máx	$Tr = 25$	$Tr = 50$	$Tr = 100$
GVE ₁	t	0.1446	1.323 <	–	0.2312	18.722	4.567	–0.015	1.16	20.5	25.2	38.5	41.8	45.2
GVE ₁	PMD_{100}	0.8404	3.059 >	–	0.4815	3.147	4.525	0.063	3.45	18.1	31.5	43.0	45.5	47.9
GVE ₁	EAU	1.0516	1.631 <	–	0.2811	9.420	4.506	–0.013	1.17	19.3	26.6	39.6	42.9	46.2
GVE ₂	t, PMD_{100}	0.2129	–	0.9588	0.3432	–3.109	3.896	0.008	3.55	17.8	30.9	41.8	44.5	47.1
GVE ₂	t, EAU	–0.3694	–	3.1851	0.1028	–8.524	4.619	0.019	1.33	17.8	27.9	40.5	43.6	46.5
GVE ₂	PMD_{100}, EAU	0.9791	–	1.4744	0.3809	–16.158	3.991	0.063	3.49	17.6	31.9	42.1	44.3	46.4
LOG ₁	t	0.1446	1.323 <	–	0.2312	20.331	3.041	–0.180	1.00	20.5	25.1	38.1	42.2	46.8
LOG ₁	PMD_{100}	0.8404	3.059 >	–	0.4815	4.888	2.886	–0.130	3.48	18.3	31.6	43.0	46.2	49.8
LOG ₁	EAU	1.0516	1.631 <	–	0.2811	10.980	2.997	–0.178	1.05	19.2	26.5	39.3	43.3	47.8
LOG ₂	t, PMD_{100}	0.2129	–	0.9588	0.3432	–1.380	2.561	–0.165	3.50	18.1	31.2	41.9	45.2	48.8
LOG ₂	t, EAU	–0.3694	–	3.181	0.1028	–6.637	3.019	–0.158	1.34	18.0	28.1	40.5	44.3	48.4
LOG ₂	PMD_{100}, EAU	0.9791	–	1.4744	0.3809	–14.623	2.544	–0.130	3.47	17.4	32.0	42.0	44.9	48.0
PAG ₁	t	0.1446	1.323 <	–	0.2312	13.591	10.672	0.391	1.67	20.2	24.8	37.9	39.7	41.1
PAG ₁	PMD_{100}	0.8404	3.058 >	–	0.4815	–2.016	11.596	0.539	3.53	18.1	31.4	42.4	43.6	44.4
PAG ₁	EAU	1.0516	1.631 <	–	0.2811	4.325	10.556	0.395	1.57	19.0	26.2	39.0	40.8	42.2
PAG ₂	t, PMD_{100}	0.2129	–	0.9588	0.3432	–7.186	9.354	0.434	3.69	18.3	31.0	41.6	43.0	44.1
PAG ₂	t, EAU	–0.3694	–	3.1851	0.1028	–13.552	11.230	0.454	1.35	17.8	27.8	40.1	41.7	42.8
PAG ₂	PMD_{100}, EAU	0.9791	–	1.4744	0.3809	–20.713	10.231	0.540	3.60	17.2	31.9	41.6	42.6	43.3

4. CONCLUSIONES

Los análisis de frecuencias de crecientes (AFC) en registros no estacionarios o con tendencia serán, en el futuro inmediato, cada vez más comunes, debido al desarrollo de la sociedad y a los efectos de cambio climático. Un enfoque práctico para realizar el AFC en tales registros, utiliza la generalización del método de los momentos L, para estimar los parámetros de ajuste de los modelos probabilísticos cuyo parámetro de ubicación (u) varía con una o dos covariables.

En el desarrollo de las dos aplicaciones numéricas descritas se observa la simplicidad del método

expuesto y la sencillez para obtener las predicciones asociadas a probabilidades de no excedencia. Además, en la segunda aplicación numérica se expone cómo proceder en la búsqueda del mejor modelo probabilístico no estacionario que represente al registro disponible, al usar cada covariable y la combinación de dos de ellas. La selección de tal modelo se basa en el coeficiente de correlación o de determinación y en el error estándar de ajuste. Los AFC expuestos se pueden aplicar a otros datos hidrológicos extremos, como precipitaciones, temperaturas, vientos y niveles del mar.

REFERENCIAS

- Aissaoui-Fqayeh, I., El-Adlouni, S., Ouarda, T. B. M. J., & St-Hilaire, S. A. (2009). Développement du modèle log-normal non-stationnaire et comparaison avec le modèle GEV non-stationnaire. *Journal-des Sciences Hydrologiques*, 54(6), 1141–1156.
- Álvarez-Olguín, G., y Escalante-Sandoval, C. A. (2016). Análisis de frecuencias no estacionario de series de lluvia anual. *Tecnología y Ciencias de Agua*, 7(1), 71–88.
- Asquith, W. H. (2011). *Distributional Analysis with L-moment Statistics using the R Environment for Statistical Computing*. Chapter 5: Probability-Weighted Moments, 77–86. Author edition. Texas, U.S.A. ISBN-13: 978-1463508418.
- Benson, M. A. (1962). Plotting positions and economics of engineering planning. *Journal of Hydraulics Division*, 88(6), 57–71.
- Campos-Aranda, D. F. (2003). *Introducción a los Métodos Numéricos: Software en Basic y aplicaciones en Hidrología Superficial*. Capítulo 5: Ajuste de Curvas, 93–127. Editorial Universitaria Potosina. San Luis Potosí, S.L.P., México. ISBN-970-705-019-5.
- Campos-Aranda, D. F. (2012). Técnicas asociadas al Análisis de Frecuencia de Crecientes en cuencas con desarrollo urbano. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 13(3), 385–392.
- Campos-Aranda, D. F. (2019). Ajuste con momentos L de las distribuciones no estacionarias GVE_1 y GVE_2 a series de *PMD*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 75–105.
- Coles, S. (2001). *An introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer-Verlag London Limited. London, England. ISBN 1-85233-459-2.
- Davis, P. J. (1972). Gamma Function and related functions, 253–296. In: Abramowitz M., Stegun I. A. (eds.). *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications. New Work, U.S.A. ISBN 486-61272-4.
- El Adlouni, S., Ouarda, T. B. M. J., Zhang, X., Roy R., & Bobée, B. (2007). Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model. *Water Resources Research*, 43(3), 1–13.
- El Adlouni, S., Bobée B., & Ouarda, T. B. M. J. (2008). On the tails of extreme event distributions in hydrology. *Journal of Hydrology*, 355(1–4), 16–33.
- El Adlouni, S., & Ouarda, T. B. M. J. (2008). Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non stationnaire. *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(1), 35–50.
- Franks, S. W., White, C. J., & Gensen, M. (2015). Estimating extreme flood events—assumptions, uncertainty and error, 31–36. *Proceedings of the IAHS, No. 369: Extreme Hydrological Events*.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C., & Wallis, J. R. (1979). Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, 15(5), 1049–1054.
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis. An approach based on L-moments*. Cambridge University Press. Cambridge, England. ISBN-100-521-01940-0.

- Jakob, D. (2013). Nonstationarity in Extremes and Engineering Design, 393–417. In: AghaKouchak A, Easterling D., Hsu, K, Schubert S., Sorooshian S. (eds.). *Extremes in a Changing Climate*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. ISBN 978–94–007–4478–3.
- Katz, R. W. (2013). Statistical Methods for Nonstationary Extremes, 15–37. In: AghaKouchak A, Easterling D., Hsu, K, Schubert S., Sorooshian S. (eds.). *Extremes in a Changing Climate*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. ISBN 978–94–007–4478–3.
- Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J. C., Gachon, P., & Bobée, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 534–552.
- Kim, S., Nam, W., Ahn, H., Kim, T., & Heo, J. H. (2015). Comparison of nonstationary generalized logistic models based on Monte Carlo simulation, 65–68. *Proceedings of the IAHS*, No. 371: Hydrologic non-stationarity and extrapolating models to predict the future.
- Kite, G. W. (1977). *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions, 156–168. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado, U.S.A. ISBN–0–918334–23–3.
- López de la Cruz, J., y Francés, F. (2014). La variabilidad climática de baja frecuencia en la modelación no estacionaria de los regímenes de las crecidas en las regiones hidrológicas Sinaloa y Presidio–San Pedro. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 79–101.
- Martins, E. S., & Stedinger, J. R. (2000). Generalized maximum-likelihood GEV quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research*, 36(3), 737–744.
- McCuen, R. H., & Thomas, W. O. (1990). Flood frequency analysis techniques for urbanizing watersheds, 35–46. *Symposium Proceedings on Urban Hydrology*. American Water Resources Association. Bethesda, Maryland, U.S.A.
- Meylan, P., Fabre, A. C., & Musy, A. (2012). *Predictive Hydrology. A Frequency Analysis Approach*. Chapter 1: Introduction. 1–13. CRC Press. Boca Raton, Florida, U.S.A. ISBN: 978–1–57808–747–1.
- Mudersbach, C., & Jensen, J. (2010). An advanced statistical extreme value model for evaluating storm surge heights considering systematic records and sea level scenarios, currents 23. *Proceedings of the 32nd Conference on Coastal Engineering*. Shanghai, China.
- Nadarajah, S. (2005). Extremes of daily rainfall in west central Florida. *Climatic Change*, 69(2–3), 325–342.
- Ostle, B., & Mensing, R. W. (1975). *Statistics in Research*. Chapter 7: Regression Analysis, 165–236. Iowa State University Press. Ames, Iowa, U.S.A. ISBN 0–8138–1570–3.
- Park, J. S., Kang, H. S., Lee, Y. S., & Kim, M. K. (2011). Changes in the extreme daily rainfall in South Korea. *International Journal of Climatology*, 31(15), 2290–2299.
- Prosdocimi, I., Kjeldsen, T. R., & Svensson, C. (2014). Non-stationarity in annual and seasonal series of peak flow and precipitation in the UK. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(5), 1125–1144.
- Prosdocimi, I., Kjeldsen, T. R., & Miller, J. D. (2015). Detection and attribution of urbanization effect on flood extremes using nonstationary flood frequency models. *Water Resources Research*, 51(6), 4244–4262.
- Rao, A. R., & Hamed, K. H. (2000). *Flood Frequency Analysis*. Chapter 1: Introduction, 1–21. CRC Press. Boca Raton, Florida, U.S.A. ISBN 0–412–55280–9.
- Sheffield, J., & Wood, E. F. (2011). *Drought. Past Problems and Future Scenarios*. Chapter 3: The Science of Drought, 17–42. Earthscan LLC. Washington, D.C., U.S.A. ISBN 978–1–84971–082–4.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events, 18.1–18.66. In: Maidment D. R. (ed.). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. New York, U.S.A. ISBN 0–07–039732–5.

- Teegavarapu, R. S. V. (2012). Floods in a Changing Climate. Extreme Precipitation. Chapter 6: Precipitation variability and teleconnections, 169–192. International Hydrology Series (UNESCO) and Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. ISBN 978–1–107–01878–5.
- Zelen, M., & Severo, N. C. (1972). Probability Functions, 925–995. In: Abramowitz M., Stegun I. A. (eds.). Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications. New Work, U.S.A. ISBN 486–61272–4.

Como citar este artículo:

Campos–Aranda, D. F. (2020). Análisis de Frecuencias de Crecientes No Estacionario con una y dos Covariables. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 47-61. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental
para América Latina y el Caribe

El Reto de la Sostenibilidad Hídrica en Panamá; perspectiva urbana de su manejo integrado para un país interoceánico

The Challenge of Water Sustainability in Panama; urban perspective of its integrated management for an inter-oceanic country

Emilio Messina ^{1*}

Recibido: 11/09/2019

Aceptado: 14/08/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

Panamá requiere una nueva iniciativa salvadora que nazca de la necesidad de enfrentar dos crisis en nuestro país, (i) la de la disponibilidad futura del agua como elemento natural y (ii) su adecuada gestión. Para esto, hay que comprender que ambas están íntimamente relacionadas, y necesariamente la demanda social insatisfecha, propone la superación de trasnochadas visiones fragmentadas que dificultan ver integralmente un tema tan complejo como la gestión urbana del agua y en su lugar, siguen siendo consistentes con modelos de gestión abiertamente eco-analfabetas que sin atender el conjunto, pierden la perspectiva de los principales problemas asociados al agua y sus potenciales soluciones. Para ello, requiere de manera urgente, una lectura holística que proviene de diferentes paradigmas de ciencias, escuelas de pensamiento derivados de estos, la multidisciplinaria como modelo pedagógico y la innovación y el emprendimiento como motores de una propuesta transformadora en materia de política pública.

Palabras clave: Desarrollo Sostenible, disponibilidad de agua, saneamiento, Seguridad Hídrica

Abstract

Panama requires a new saving initiative born out of the need to face two crises in our country: (i) the future availability of water as a natural element and (ii) its adequate management. For this, it must be understood that both are intimately related, and necessarily the unsatisfied social demand, proposes the overcoming of outdated fragmented visions that make it difficult to see integrally such a complex issue as urban water management and instead, remain consistent with openly eco-literate management models that without addressing the whole, lose the perspective of the main problems associated with water and its potential solutions. For this, it urgently requires a holistic reading that comes from different science paradigms, schools of thought derived from these, multidisciplinary as a pedagogical model, and innovation and entrepreneurship as drivers of a transformative public policy proposal.

Keywords: Sustainable Development, water availability, sanitation, Water Security.

1 Asuntos Institucionales y Proyectos. División de Ambiente. Vicepresidencia de Agua y Ambiente. Autoridad del Canal de Panamá, Panamá. emessina@pancanal.com

SINERGIAS

De acuerdo el estudio realizado en 2016, sobre crecimiento urbano en Panamá, (según el Banco Interamericano de Desarrollo, BID, 2016. Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles. Estudio de Crecimiento Urbano para Panamá) el Área Metropolitana del Pacífico (AMP), para el 2030, la población llegará a casi 2.210.000 habitantes. Para el 2050, la población de esta misma zona, tendrá algo más de 2.780.000 habitantes en total; lo que representará el 49% de la población nacional frente al 44% actual, una media de 30.000 habitantes más al año que demandarán servicios de agua.

De acuerdo al Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050, Agua para Todos, pág.23, la disponibilidad total de agua dulce se ha calculado en 119.5 mil millones de metros cúbicos mientras que las estimaciones del incremento de la demanda de agua al año 2050, prevén un excedente superior al 50% de esa disponibilidad (PNSH, 2016). Eventos climáticos extremos como las tormentas ocurridas en la historia reciente de este país centroamericano como, “La Purísima (2010) y Otto (2017)”, afectan la calidad y la disponibilidad de este recurso y ponen a prueba nuestra limitada capacidad de respuesta y baja resiliencia de la población.

Ante lo expuesto, asegurar nuevas fuentes de agua no es suficiente, lo que pone de manifiesto la necesidad inminente y urgente de conjugar una política pública integrada, voluntad política en la toma de decisiones, un ejercicio de la rectoría que unifique las acciones, construcción de una cultura del agua bajo una misma visión de país y la aplicación de la ciencia e innovación como elemento dinamizador de la propuesta.

Cabe preguntarnos:

¿cuál es el país que queremos y cuánta agua será la necesaria para sostenerlo?

¿Cuál es la nueva pedagogía de la sostenibilidad del agua urbana requerida como base de una política pública moderna?

Desde una perspectiva de política pública Panamá cuenta con un Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos, (PNSH) y un Consejo Nacional del Agua (CONAGUA), no obstante, desde

mi perspectiva, luego de su formulación y a pesar de los diferentes estudios para evaluar el potencial hídrico de algunas cuencas del país, el PNSH, no ha enfrentado con suficiencia un reto adicional e impostergable que permita reorientar el Plan hacia su adecuada y oportuna socialización e implementación, esto es, democratizarlo creando nuevos espacios de participación en la divulgación de sus resultados, pero más importante que esto es, que los amplios sectores que fueron consultados en su formulación, puedan también participar activamente en el proceso de implementación y apropiación ciudadana, además de la necesidad de desarrollar un adecuado modelo de gestión financiera que genere una interface, entre metas y fuentes de financiamiento disponibles; porque no se trata de una estrategia de gobierno, se trata de la soberanía hídrica de nuestro país.

Los registros indican que en nuestro país el consumo proyectado para el año 2025 fue alcanzado y rebasado en el 2012, es decir, 13 años antes. El crecimiento del país ha aumentado la capacidad adquisitiva de propios y extranjeros impactando la demanda de agua para el desarrollo de urbanizaciones, grandes edificios, centros comerciales y demás, agravado por una cultura despilfarradora. Alrededor de 1.9 millones de personas se abastecen del agua proveniente de los embalses del Canal de Panamá; lo cual representa más de la mitad de la población del país, sistemas altamente presionados.

Fuera del sistema hídrico actual, es de interés de Panamá, asegurar la disponibilidad de agua que permita enfrentar el estrés hídrico que se proyecta catastróficamente grave entre los años 2025 y 2050, en los cuales la demanda habrá superado en 50% la disponibilidad del recurso.

Cada vez es más evidente la escasez de este elemento natural y su creciente contaminación, lo que se refuerza la necesidad de enfocar acciones de promoción, difusión, investigación y apoyo en general al uso eficiente del agua.

En este sentido, se requiere una política pública integrada que potencie como uno de sus ejes, los deberes de las personas, la auto-responsabilidad y el consumo ético del agua (figura 1).

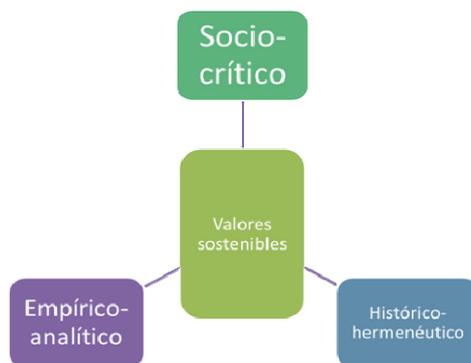


Figura 1. Paradigmas de ciencia

Los patrones de consumo excesivo y desperdicio que elevan la demanda de agua a 400 litros/habitante/día. Con esta cifra, Panamá supera en más del doble el promedio de consumo de agua de todos los países de Latinoamérica. Lo que podría indicar que la subcultura del agua en Panamá basada en el despilfarro, es el principal valor que habría que

cambiar, para lo cual es necesario que la vieja escuela Newtoniana-Cartesiana, sea superada en materia de educación y nos permita replantear los viejos valores mecánicos que nos impiden relacionarnos adecuadamente con el agua, y cuyo resultado nos tiene en la peor crisis hídrica de todos los tiempos (ver figura 2).

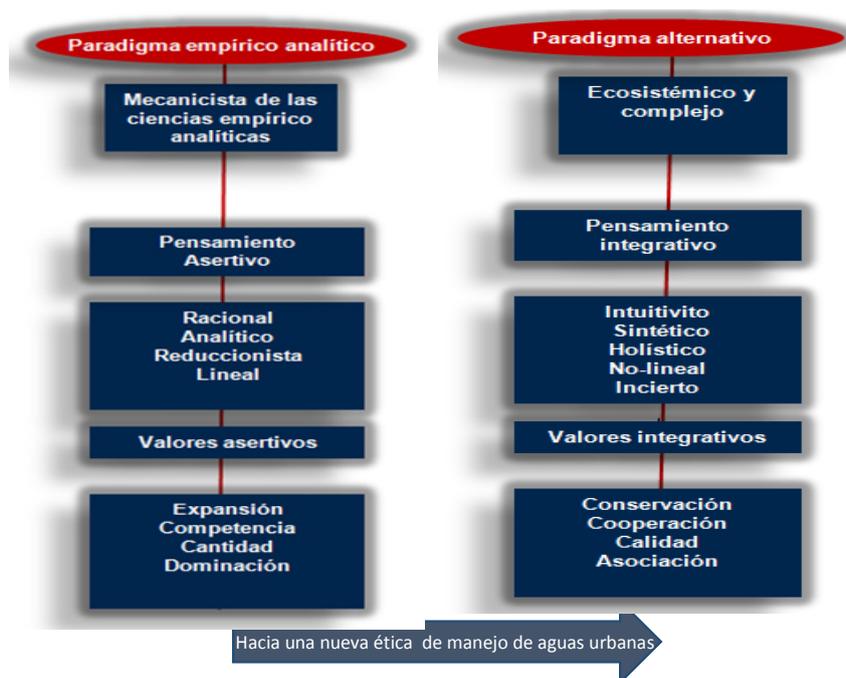


Figura 2. Nuevos valores para la conservación del agua

En esta misma dirección, como deber ciudadano, no es solo responsabilidad del Estado su implementación y democratización, se hace urgente que como toda política pública moderna, los grupos de interés potencialmente participen en su adecuada financiación y fiscalización, como derecho y deber

ciudadano, con todos los actores, en alianza con iniciativas privadas que permitan blindar este recurso que sustenta parte del modelo de negocios del país y para el consumo humano de su población, con lo que evitaremos con toda seguridad, que la ciudad de

Panamá se convierta en la siguiente Ciudad del Cabo en materia de disponibilidad de agua.

Esto requiere además, una acción comunicativa diferenciada que sensibilice y cree capacidades entre la población sobre el uso adecuado agua y de las mejores prácticas en materia de consumo eficiente y conservación de este recurso finito que incluya: (i) una gestión integrada del modelo pedagógico con arreglo a fines que asegure la formación de una cultura de la conservación bajo un enfoque

antropológico en la arquitectura del mensaje; (ii) gestión financiera público – privada con arreglo a fines en asociatividad con grupos de interés; (iii) política pública que integre los sectores primario, secundario y terciario de la economía orientados por procesos de P + L y eficiencia en sus operaciones y (iv) aplicar la rectoría y la regulación a través de la jurisdicción coactiva de las instituciones del Estado como coadyuvante y complemento en la formación de una cultura del agua (ver figura 3).

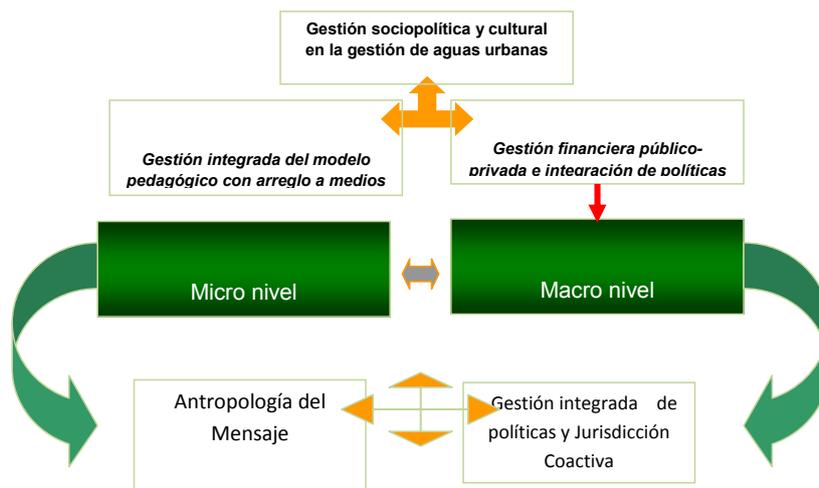


Figura 3. Modelo integrado para una política pública

Para esto hace falta elaborar políticamente una mirada pedagógica distintiva desde la interacciones e interrelaciones de los tres grandes sistemas del mundo, la naturaleza, la economía y la sociedad; y de las múltiples interacciones que suceden entre estos tres grandes sistemas y las infinitas interacciones que ocurren entre sus componentes, dentro de los cuales el agua es el eje integrador de la actividad humana (ver figura 4). Este cambio de perspectiva en la gestión urbana del agua facilitaría un adecuado sistema de transferencias entre (i) políticas integradas (ii) sistemas integrados de investigación; (iii) sistemas integrados de información; (iv) sistemas integrados de transferencia y; (v) una nueva ética que nos permita una mejor relación con la naturaleza y de la conservación del agua como elemento y recurso natural, para diferentes usos y usuarios (Tarté, 2012).

En una dimensión territorial, para que esto sea posible, es una condición sine qua non, pensar al país Panamá como una sola unidad de gestión y se debe cumplir con al menos tres condiciones: (i) capacidad técnica-científica para una manejo integrado en una

dimensión espacial e interconectada del agua (el país como una macrocuenca); (ii) aplicación de la innovación y alta tecnología y (iii) decisión política para hacerlo o hacerlo.

Bajo el entendido que esta propuesta de trayecto está plena de rocas, es necesario tener claridad que la gestión del agua, representa también la gestión del conflicto y de la concertación. Si, la voluntad política considera esta iniciativa bajo una perspectiva integradora pertinente y oportuna, será perfectamente viable para un país de más de 75 mil kilómetros cuadrados y 52 cuencas hidrográficas, politizando el acto pedagógico para que sea transformador, otorgándole jerarquía de tema de Estado y un asunto de seguridad nacional.

No solo de voluntad política vive el hombre y la mujer, y cabe por lo pronto una acción ciudadana ejemplar y potenciar el papel de la sociedad civil, organizada o no, fortaleciendo sus capacidades y formando en valores para una verdadera ciudadanía del agua. Gestionar adecuadamente la exponencial demanda que se multiplica y presiona este recurso;

proponer un modelo de gestión financieramente sostenible y asegurar su aprovechamiento para los próximos 100 años, es tarea de todos y todas, y de ser así, con certeza promete convertir a Panamá en la

futura capital del agua en la Región de las Américas, y por su abundancia de agua y vocación transitista, en un país interoceánico de elevado impacto hídrico en el contexto global.

REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo, BID (2016). Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles. Estudio De Crecimiento Urbano Para Panamá.
- Capra, Fritjof. (1998) La Trama de la vida. Anagrama. España.
- Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica (2016). Plan Nacional de Seguridad Hídrica: 2015-2050: Agua para Todos. Panamá, República de Panamá. 168 páginas.
- Messina, Emilio. (2011). New ecosystemic and complex pedagogy for water sustainability. UNESCO. Second International Symposium on Building Knowledge bridges for a sustainable water forum. Panamá. Page 240-247.
- Messina, Emilio. (2012). Diálogo pedagógico con la naturaleza: la educación que salvará el planeta. Editorial UDELAS, Panamá.
- PNSH (2016). Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos, Panamá, Páginas 22 y 23.
- Tarté, R. (2012). Analfabetismo Ecológico: el conocimiento en tiempos de crisis. Ciudad de Panamá, Panamá. Fundación de Ciudad del Saber.
- Tarté, R. (2012). Analfabetismo Ecológico: el conocimiento en tiempos de crisis. Ciudad de Panamá, Panamá. Fundación de Ciudad del Saber
- Worster, Donald. (2004). Transformaciones de la tierra. Visarro. IDEN. Panamá. Pág. 2.

Como citar este artículo:

Messina, E. (2020). El Reto de la Sostenibilidad Hídrica en Panamá; perspectiva urbana de su manejo integrado para un país interoceánico. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 62-66. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Daños económicos y sociales por huracanes e inundaciones en México: periodo de 2010 a 2015

Economic and social damages by hurricanes and floods in Mexico: period from 2010 to 2015



Juan Pablo Molina-Aguilar ^{1*}, Alfonso Gutiérrez-López ²

Recibido: 31/01/2020

Aceptado: 16/04/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

Cada temporada de ciclones tropicales México registra importantes afectaciones debido a su ubicación entre las cuatro regiones de generación. En el presente trabajo se realizó un análisis de los efectos producidos tanto por la incidencia directa de los ciclones tropicales como por los efectos indirectos causados por las lluvias e inundaciones durante el periodo 2010 a 2015. Se recopiló información oficial concentrada por estado y año en siete categorías de nueve consideradas por la Secretaría de Gobernación a través del Centro Nacional de Prevención de Desastres. Los datos fueron mapeados, considerando las afectaciones por categoría en cada estado y año. Se observó que los estados más afectados durante el periodo de estudio fueron Veracruz, Tabasco, Oaxaca y Chiapas, que comparten límites territoriales en la región más estrecha del país ubicada entre el Golfo de México y el Océano Pacífico. Los años 2010 y 2013 fueron los de mayor daño económico por ciclones tropicales, mientras que 2010 y 2011 fueron los de mayor daño económico por lluvias e inundaciones. Durante el periodo de estudio, se concluyó que los efectos de los ciclones tropicales provenientes del Atlántico que ingresan a la Península de Yucatán y se intensifican en el Golfo de México provocan lluvias, inundaciones y efectos importantes con respecto a los del Pacífico donde la categoría del fenómeno es proporcional a los daños.

Palabras clave: Ciclón tropical; inundación; lluvias intensas; daños económicos

Abstract

Every tropical cyclone season Mexico registers important affectations due to its location among the four regions of generation. In the present work, an analysis was carried out of the effects produced both by the direct incidence of tropical cyclones and by the indirect effects caused by rainfall and floods during the period 2010 to 2015, considered as a study period. Official information was collected and concentrated by state and year in seven categories of nine considered by the Ministry of the Interior through the National Center for Disaster Prevention. The data were mapped, considering affectations by category in each state and year. It was observed that most affected states during the study period were Veracruz, Tabasco, Oaxaca and Chiapas, which share territorial limits in the narrowest region of the country located between the Gulf of Mexico and the Pacific Ocean. The years 2010 and 2013 were the years of greatest economic damage from tropical cyclones, while 2010 and 2011 were the years of greatest economic damage from rains and floods. During the study period, it was concluded that the effects of tropical cyclones from the Atlantic that enter the Yucatan Peninsula and intensify in the Gulf of Mexico cause rains, floods and important effects with respect those of Pacific where the category of the phenomenon is proportional to the damages.

Keywords: Tropical cyclone; flood; heavy rains; economic damage

1 Laboratorio de Hidráulica. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México. valnahaar@hotmail.com

2 Centro de Investigaciones del Agua, Facultad de Ingeniería, UAQ. Querétaro, México. alfonso.gutierrez@uaq.mx

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los fenómenos hidrometeorológicos intensos representan una de las amenazas más importantes en términos de pérdidas humanas y económicas asociadas. Particularmente en México, durante el 2013, representaron el 92% del total de las pérdidas vinculadas a los fenómenos naturales, convirtiéndose en la amenaza más importante y que debe ser atendida en el corto plazo (SEGOB, 2014). Las características orográficas de México, junto con su posición geográfica en la zona intertropical, lo hacen anualmente vulnerable a importantes afectaciones debido a las trayectorias de los Ciclones Tropicales (CT) en los océanos Pacífico y Atlántico (CENAPRED, 2014). Las intensas lluvias provocan inundaciones que son el origen de problemas sociales, económicos y sanitarios en la población, así como sus impactos en la infraestructura (CONAGUA, 2008). Por otro lado, hay beneficios como el aumento de la humedad en las regiones utilizadas para la agricultura, el aumento de los volúmenes almacenados en las presas, los cuerpos de agua y la recarga de los acuíferos subterráneos (Hernandez et al., 2001). Anualmente se registran un promedio de 25 CT en los mares mexicanos, de los cuales 4 o 5 entran al territorio causando daños severos (González, 2016). Las trayectorias de los CT han impactado en categoría de huracán a prácticamente toda la zona costera, tanto en el Pacífico como en la orilla del Atlántico, del país (Capurro, 2014).

Las depresiones del Banco de Campeche hacia el sureste siguen una dirección norte, las del Caribe hacen un recorrido hacia el oeste, entrando a la Península de Yucatán y continuando su recorrido en las aguas del Golfo de México, impactando posteriormente los estados de Veracruz y Tamaulipas. Por otro lado, en el Pacífico, al formarse en el istmo de Tehuantepec, tienen dos comportamientos generales, el primero es alejarse con dirección oeste y el segundo es viajar paralelo a las costas, entrando por la región noroeste del país. En cuanto a las amenazas naturales, las inundaciones se caracterizan por su alta frecuencia y ocurrencia en grandes áreas territoriales (Alexander, 1993; WMO, 1990). Mantienen sumergidas tierras secas por periodos prolongados, ante la presencia súbita e inusual de agua en zonas donde no es habitual (Aparicio, 1998).

Sus elementos más relevantes son la distribución espacial de la lluvia, los parámetros geomorfométricos, la red de drenaje existente y la infraestructura humana presente en una cuenca hidrológica (CENAPRED, 2001). En innumerables los casos de inundaciones generadas por el exceso de precipitaciones, los daños se ven incrementados por la falta de capacidad hidráulica de los sistemas de drenaje, el exceso de basura y los desechos urbanos dentro de la cuenca. Esto repercute tanto en el desarrollo como en las consecuencias de las catástrofes naturales derivadas de las actividades humanas en el medio ambiente (Ovsei, 1996). En las últimas décadas, muchas regiones del país han experimentado un acelerado proceso de urbanización. Lo que ha hecho más evidente los daños potenciales causados por CT (Hernandez et al., 2001), lo que eleva significativamente la amenaza, entendida como la manifestación de un lugar específico en un momento determinado donde el daño a una comunidad es latente y que es vulnerable (Cardona, 1996). La amenaza establece el riesgo de un lugar relacionándolo con su vulnerabilidad. Se define como la probabilidad de que se produzcan daños y pérdidas significativas para la sociedad. Por ello, el riesgo se produce por la interacción de los factores de amenaza y vulnerabilidad (Lavell, 2002). Durante la temporada oficial de ciclones tropicales, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) realiza una vigilancia permanente. Para ello, realiza y emite pronósticos y avisos durante la ocurrencia del fenómeno, así como boletines informativos al término del mismo (Hernandez et al., 2001). La información permite al Sistema Nacional de Protección Civil establecer las tres fases de alerta a la población. La primera fase, que es permanente, se activa en el periodo comprendido entre el 15 de mayo y el 30 de noviembre de cada año. Durante este tiempo, si hay un CT, los avisos se realizan con intervalos de 12 horas. La segunda fase se activa si el CT se encuentra a menos de 500 km de la costa, reduciendo el intervalo a 6 h para los avisos. La última fase tiene lugar si hay una amenaza evidente para el territorio y los avisos pasan a ser cada 3 horas. Cada aviso informa de la posición del ciclón, su trayectoria probable, la previsión y las zonas de alerta (SEGOB, 2008). El presente trabajo tiene como objetivo analizar los efectos de los ciclones tropicales en México, aunados a los causados por las lluvias e inundaciones durante el periodo de 2010 a 2015 con base en datos de fuentes oficiales de la Secretaría de Gobernación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Resúmenes de ciclones tropicales

La evaluación anual de los daños por desastres naturales en México es una tarea de la Secretaría de Gobernación (SEGOB) apoyada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), los cuales están disponibles a través de la web www.cenapred.gob.mx. Esta actividad es llevada a cabo por especialistas, quienes realizan visitas de campo y adquisición de datos con autoridades de diferentes niveles de gobierno. La información generada forma parte del sistema de apoyo a la decisión para la asignación de recursos para atender la contingencia y desarrollar programas para enfrentar la vulnerabilidad económica y social. En 2010, 2011 y 2012 se publicaron los documentos

"Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana" (García et al., 2012; 2013; 2014). Además en 2013, 2014 y 2015 cambiaron su nombre a "Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana" (García et al., 2015; 2016; 2017). Estos son una síntesis de los efectos causados por fenómenos hidrometeorológicos, geológicos, químicos, sanitarios y socio-organizativos.

2.2 Tratamiento de la información

El tratamiento de la información investigada, tanto de los ciclones tropicales como de las precipitaciones e inundaciones registradas en México, se realizó por categorías (figura 1).



Figura 1. Trayectoria de los ciclones tropicales en los océanos Pacífico y Atlántico registrados por año (a) 2010, (b) 2011, (c) 2012, (d) 2013, (e) 2014 y (f) 2015.

Los documentos del CENAPRED consideran nueve categorías en sus resultados: muertos, población y unidades económicas afectadas, viviendas, escuelas, unidades de salud, hectáreas cultivadas y kilómetros de caminos dañados, así como los daños totales en millones de pesos (mdp) (García et al., 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017). Sin embargo, para el periodo de estudio, no existen categorías de información sobre todas ellas. Sólo se consideraron siete, se omitieron del análisis los daños de la unidad económica y el kilometraje de las carreteras afectadas. Posteriormente, se concentró la información para cada categoría, obteniendo la información acumulada anualmente y por estado.

Esta información fue, junto con la corrida y la inundación, representada en mapas. Esto permitió visualizar gráficamente las afectaciones en cada uno de los estados de la República Mexicana. De igual manera se elaboraron gráficas anuales para los daños por ciclones tropicales, así como para las lluvias e inundaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapeo de las defunciones en el periodo 2010 - 2015 muestra los resultados en una escala de 5 intervalos utilizando el número máximo de

defunciones reportadas (figura 2). Se observa que los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán tuvieron el mayor número de muertes y está correlacionado con sus condiciones de pobreza, Seguidos de Veracruz, Puebla, San Luis Potosí y Nuevo León situados en la "Sierra Madre Oriental" que es la barrera natural para el CT que proviene del Océano Atlántico, generando en sus territorios la

disipación del fenómeno con la entrada de fuertes volúmenes de lluvia. De igual manera Jalisco y Sonora donde existe una alta probabilidad de incidencia de CT con origen en el istmo de Tehuantepec y que por las trayectorias históricas características son lugares donde ingresan al país disipando su energía en la "Sierra Madre Occidental".



Figura 2. Defunciones registradas a nivel estatal

En la categoría de afectados (figura 3) el rango establecido con el máximo número de personas también se dividió en cinco clases. Muestran que los estados de Veracruz y Tabasco durante en el periodo entre 2010-2015 reportaron las mayores afectaciones. Seguidos de otros estados como Oaxaca, Quintana Roo y Tamaulipas, por su condición topográfica de baja pendiente que favorece las inundaciones en las regiones cercanas a la costa y adyacentes a los ríos, responsables del tránsito de altos volúmenes de escurrimiento. Mientras que Coahuila y Durango se ubican entre la Sierra Madre Oriental y Occidental, que recogen las precipitaciones resultantes de la disipación de los fenómenos al ingresar al país.

En cuanto a la afectación a la infraestructura (particularmente a las viviendas) el estado de México, Veracruz y Tabasco registraron los mayores daños (figura 4). Chiapas, Guerrero, Nayarit y Zacatecas se observan con daños medios, todos ellos representan la tercera parte de los estados con afectaciones importantes del País. En cuanto al resto de los estados, se observa que la tercera parte tuvo afectaciones menores: Baja California Norte, Baja California Sur, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo y Yucatán. En el resto de los estados se pueden considerar afectaciones medias. En cuanto a los edificios escolares, sólo fueron afectados

los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco, este último con el mayor número de escuelas dañadas reportadas (figura 5). Cabe destacar en este rubro que prácticamente el centro, el norte y las penínsulas de Baja California y Yucatán sufrieron daños mínimos. La categoría de unidades de salud dañadas se concentra en Oaxaca y Tabasco, seguidos por el estado de Campeche (figura 6), con más de 21 unidades dañadas, alcanzando el máximo de 108 unidades. El resto del país presentó impactos menores en este rubro. Por otro lado, las zonas agrícolas ubicadas en la región central del país hasta la Península de Yucatán son afectadas (figura 7), la mayor se registró en Tabasco, Nayarit y Oaxaca, junto con Michoacán, Veracruz y Chiapas que presentaron daños medios. Cuando se integran las categorías de daños y se traducen en valor económico en millones de pesos, es evidente la región del país donde se producen las mayores pérdidas económicas (figura 8). Los estados sureños de Tabasco, Veracruz, Chiapas y Oaxaca fueron los más afectados y se encuentran en el istmo de Tehuantepec, la región más estrecha del país. Esta región se encuentra entre el Golfo de México al norte y el Golfo de Tehuantepec al sur, ambos con las condiciones necesarias para la generación de CT o para aumentar su fuerza. Esta región tiene el nivel de desarrollo socioeconómico más bajo del país. La información a nivel estatal es

útil para entender los efectos del CT en el país durante el período de estudio (figuras 2 a 8). Es igualmente importante analizar a escala temporal, es decir, anualmente, cuándo se produjeron los daños en

cada categoría y asociarlos con eventos específicos y sus características físicas. De tal forma que se establezca la relación entre las características del evento y las afectaciones asociadas al mismo.

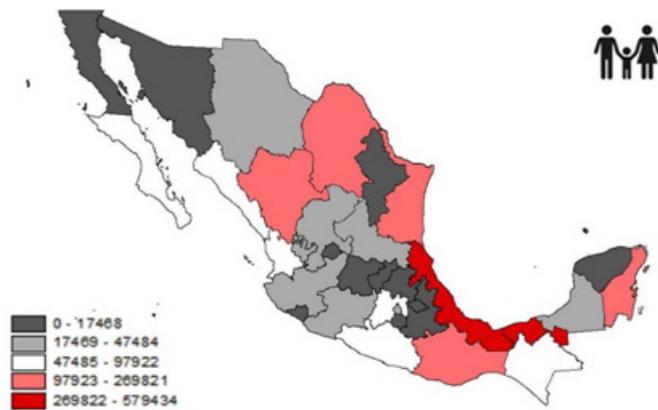


Figura 3. Personas afectadas a nivel estatal

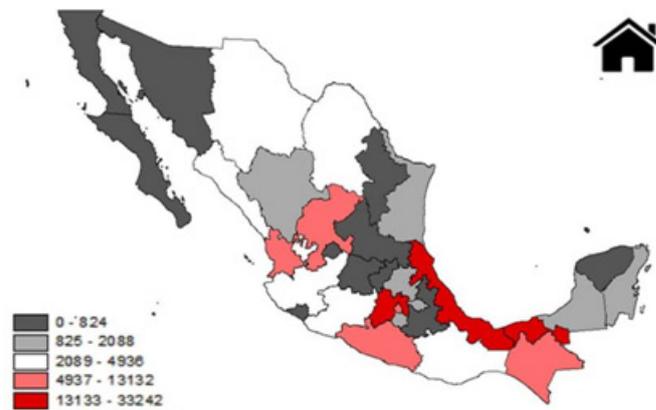


Figura 4. Casas dañadas a nivel estatal



Figura 5. Escuelas dañadas a nivel estatal



Figura 6. Unidades de salud dañadas a nivel estatal



Figura 7. Hectáreas cultivadas a nivel estatal



Figura 8. Daños totales (mdp) a nivel estatal

Para ser más concisos en el análisis de la información, se presentan por separado los datos relacionados con el CT y los asociados a las lluvias en las inundaciones en el periodo de 2010 a 2015.

En los rubros de defunciones (figura, 9) y población afectada (figura, 10) se observa claramente que en septiembre de 2013 el CT causó la mayor devastación, derivado del hecho inusual de que dos CT coincidieron en el periodo de formación y afectación al país, este es el segundo caso registrado hasta ahora.

Estos fenómenos fueron los huracanes Manuel e Ingrid, el primero de ellos fue el decimosexto CT de la temporada en el Océano Pacífico, mientras que el segundo fue el segundo de la temporada en el Océano Atlántico. En particular, los días 15 y 16 de septiembre, los efectos de ambos se hicieron sentir en el país.

Por otro lado, en 2010, los huracanes Alex, Karl y Matthew fueron la causa específica de las afectaciones; el primero de ellos golpeó principalmente los estados del norte del país, Nuevo León y Tamaulipas, así como Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Karl lo hizo en Quintana Roo, Yucatán y Veracruz. Finalmente Matthew tuvo impacto en los estados de Chiapas y Oaxaca.

De igual forma, se pudo apreciar que durante los años 2010 y 2013, tanto las viviendas (figura, 11) como las escuelas (figura, 12) tuvieron las mayores afectaciones, en el primer año debido a los huracanes Alex, Karl y Matthew, mientras que en el 2013 por la acción conjunta de los huracanes Ingrid y Manuel. Como se mencionó anteriormente, sus efectos fueron principalmente en los estados de Veracruz, Oaxaca y Chiapas, donde las condiciones socioeconómicas son un factor importante para elevar el riesgo y la vulnerabilidad de las estructuras.

Continuando con el análisis de las unidades sanitarias (figura, 13) y las zonas de cultivo dañadas (figura, 14), el origen de los daños es similar, a diferencia de que el estado de Tabasco fue el más afectado en ambas categorías. Esto se derivó de las fuertes lluvias, que transformadas en escurrimientos superficiales llegaron al río Grijalva. Las lluvias registradas en la región norte de Guatemala y los límites con México en los estados de Chiapas y Tabasco, provocaron el desbordamiento del sistema de grandes presas; Peñitas, Chicoasén y Malpaso. Por razones de seguridad, iniciaron el flujo controlado de

agua, a pesar de que el río estaba en su máxima capacidad, lo que provocó inundaciones en toda la planicie tabasqueña (Arreguín-Cortes et al., 2014).

Al recopilar información sobre el costo económico de los daños durante las temporadas de CT (figura, 15), se puede ver claramente la importancia de los años 2010 y 2013. El primero es producto del CT que en conjunto potenció los daños en viviendas, cultivos y unidades educativas y de salud. En el segundo caso, la interacción de los huracanes Ingrid y Manuel en septiembre, que afectaron prácticamente todo el territorio nacional, fue el detonante.

Como se mencionó anteriormente los días 15 y 16 de septiembre confluyeron en territorio nacional los huracanes Ingrid y Manuel, lo que provocó que en 22 de los 32 estados de la República Mexicana se generaran desde lluvias fuertes hasta torrenciales. Sin embargo, podemos ver que con respecto al CT (Figuras 9 y 10) no hay una tendencia clara en las muertes (figura, 16) y mucho menos en la población afectada (figura, 17), ya que podemos ver en la primera categoría que las muertes registradas en 2010 y 2011 fueron más del triple de las reportadas en 2013. En cuanto a la segunda categoría, se observa que los años de 2011, 2013 y 2015 son similares en sus cifras; no así 2010, donde se reportó oficialmente una mínima población afectada.

Durante el paso de Alex en 2010 sobre en el norte del país se registraron lluvias de 91 a 316 mm en Tamaulipas, así como 600 mm promedio en Nuevo León. Estas magnitudes de lluvia llenaron a su máxima capacidad las presas de esa región, por lo que fue necesario desfogar las crecidas originadas en ríos y afluentes de la red hidrológica, que finalmente inundaron grandes extensiones de terreno. En el caso del CT Karl, se reportaron lluvias máximas en 24 h de 355 mm en la costa de Veracruz (Hernández et al., 2010). Matthew dejó a su paso lluvias máximas en 24 h de 257.2 mm en Chiapas y 182 mm en Veracruz (Díaz, 2010). Como se puede observar, las mayores afectaciones se dieron en las vertientes del Golfo de México.

En 2011 se registró el mayor número de escuelas dañadas (figura, 19), principalmente en los estados de Tabasco, Chiapas, Oaxaca y Veracruz. El primer estado con mayores daños y el último con menores, este año en particular ocupó el tercer lugar de actividad registrada desde 1969 con 18 CT a los que se les asignó nombre en el Océano Atlántico

(Hernández y Rosengaus, 2012), durante este año las tormentas tropicales Harvey y Nate fueron la causa de importantes daños en los estados mencionados. También debemos mencionar que en este año se registraron 8 impactos directos en las costas de México, 4 sistemas tropicales del Océano Pacífico y el resto del Atlántico.

Un comportamiento similar ocurrió en 2010, cuando se registraron 19 ciclones con nombre en el Océano Atlántico. Este número de eventos fue el segundo año más activo en el periodo de 1966 a 2010. De éstos, 6 afectaron directamente las costas mexicanas, en el caso particular la tormenta tropical Alex, el huracán Karl con categoría III y la depresión tropical Richard (Hernández y Rosengaus, 2011). Del análisis gráfico de las trayectorias, se distingue que aquellas con origen en el Mar Caribe generan daños en las colindancias de estos 4 estados desde el momento de acercarse al estado de Quintana Roo, cruzando la Península de Yucatán y fortaleciéndose al entrar al Golfo de México con un segundo impacto en la región Sur y Norte de Veracruz. Durante este comportamiento, los daños son importantes debido al proceso de degradación inicial en el que los suelos se saturan y la posterior intensificación en la zona, con intensas precipitaciones que se convierten repentinamente en escurrimientos superficiales.

Los daños en las unidades sanitarias (figura, 20) y en las zonas de cultivo (figura, 21) son análogos a las dos categorías descritas anteriormente. Además de los estados de Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Veracruz, también se vieron afectados los estados de Michoacán y Nayarit. En concreto, Michoacán se vio afectado por las grandes inundaciones provocadas por la depresión tropical ocho-E y el huracán Jova de categoría II (Bravo, 2016). Todos estos 6 estados se caracterizan por tener extensos territorios dedicados a actividades agrícolas y ganaderas.

En resumen, al cuantificar los daños económicos (figura, 22) en los rubros: vivienda, escuelas, unidad

de salud y áreas cultivadas; se puede observar para el periodo 2010 a 2015 que los años 2010 y 2011 son producto de daños simultáneos en el estado de la región más angosta del país debido al CT proveniente del Océano Atlántico.

Mientras que en 2015 los huracanes Carlos y Patricia fueron el origen de los daños registrados. El primero de ellos, aunque no ingresó al territorio, mantuvo la nubosidad sobre Puebla y Veracruz hacia el Golfo de México; Chiapas, Colima, Guerrero, Jalisco y Michoacán en las costas del Pacífico que provocaron intensas lluvias e inundaciones (Bravo, 2016).

Por otro lado, el segundo caso es de gran interés dado que alcanzó vientos máximos sostenidos de 260 km/h con rachas de hasta 315 km/h, lo que lo convirtió en un huracán de categoría 5 clasificándolo como extremadamente peligroso. Sin embargo, al seguir su trayectoria y enfrentarse al estado de Colima, alcanzó vientos máximos sostenidos de 325 km/h y rachas de 400 km/h, este último valor superó en 148 km/h lo especificado para la categoría máxima de la escala Saffir-Simpson (Bravo, 2015). Las características anteriores no se habían registrado antes de octubre de 2015 en ciclones tropicales del Pacífico nororiental. Esta fue la principal causa del incremento exponencial en 2010, 2011 y 2015 respecto a los daños registrados durante el resto del periodo de estudio, que pueden considerarse como mínimos.

Los resultados obtenidos en cada una de las categorías permiten en trabajos posteriores su respectiva asociación de las características temporales y espaciales de los CT ocurridos en el periodo de estudio, para ello se requiere utilizar técnicas de acoplamiento temporal y espacial entre la información generada mediante imágenes satelitales digitales con respecto a los registros obtenidos en estaciones meteorológicas automáticas, estableciendo elementos de análisis para generar tanto curvas como matrices de daños.

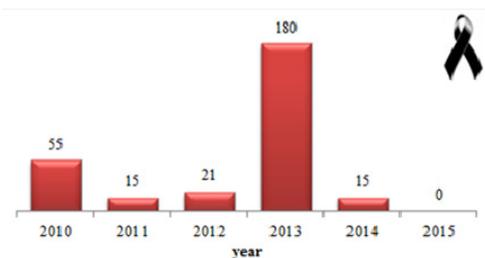


Figura 9. Muertes por CT



Figura 10. Población afectada por la CT

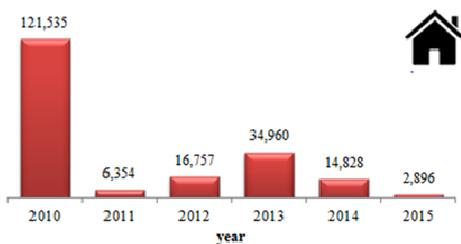


Figura 11. Casas dañadas por el CT

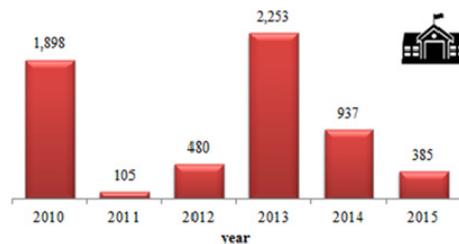


Figura 12. Escuelas dañadas por el CT

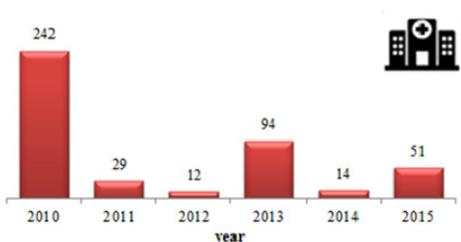


Figura 13. Unidades sanitarias dañadas por la CT

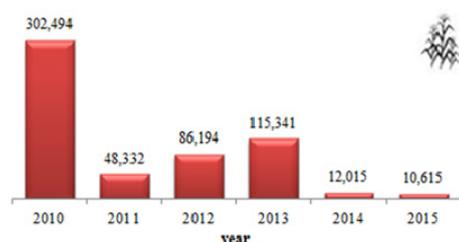


Figura 14. Áreas cultivadas dañadas por el CT

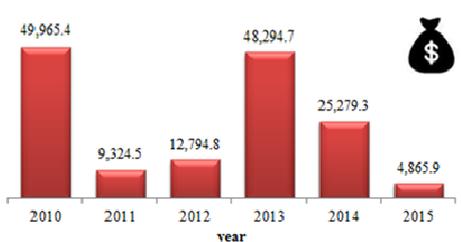


Figura 15. Daño total (mdp) generado por la CT

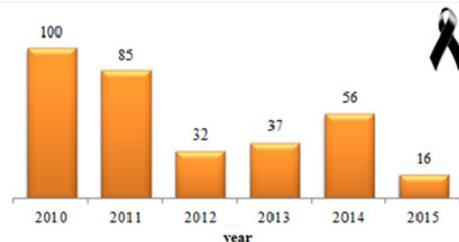


Figura 16. Muertes por lluvias e inundaciones

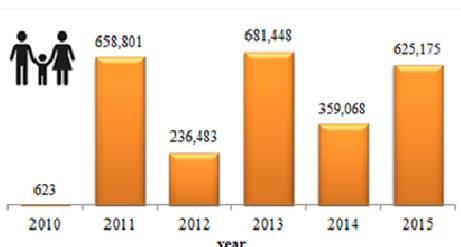


Figura 17. Población afectada por las lluvias e inundaciones

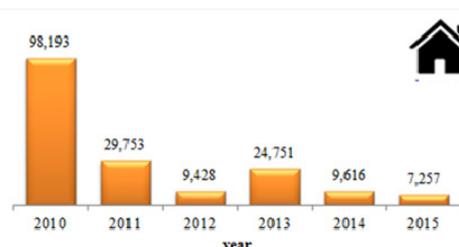


Figura 18. Viviendas dañadas por lluvias e inundaciones

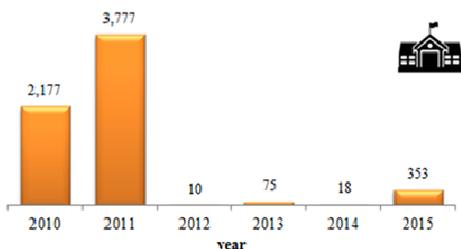


Figura 19. Escuelas dañadas por lluvias e inundaciones

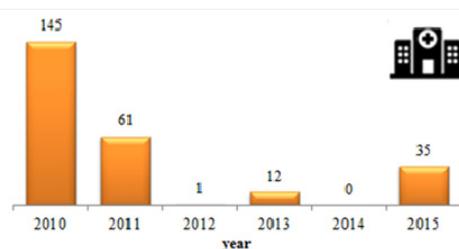


Figura 20. Unidades de salud dañadas por lluvias e inundaciones

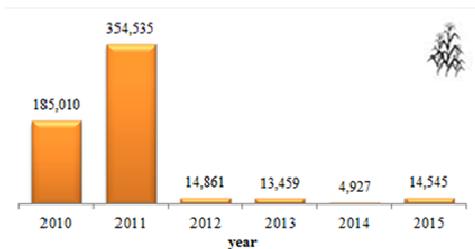


Figura 21. Superficies cultivadas dañadas anualmente por las lluvias e inundaciones

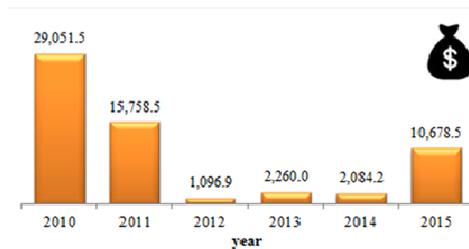


Figura 22. Daños totales (mdp) generados por las lluvias e inundaciones.

4. CONCLUSIONES

Una vez realizada la investigación y clasificación de la información oficial del periodo de estudio, generando los mapas de daños por categorías y las afectaciones anuales en cada una de ellas se concluye que: durante los años 2010 y 2011 la incidencia de TC que cruzaron la Península de Yucatán al intensificarse sobre el Golfo de México, impactando nuevamente en costas de los Estados de Tamaulipas y Veracruz son el factor detonante de importantes daños potenciados por las condiciones topográficas, sociales y económicas de los estados afectados.

Esto sucede aun cuando la categoría alcanzada por los CT no sean huracanes, dado que la disminución

de su potencial destructivo al tocar tierra y la nueva intensificación aumentan la cantidad de lluvia precipitada y su intensidad, lo que supera significativamente el periodo de retorno para el cual se realizaron obras de protección en comunidades, ciudades e infraestructura civil.

Un número importante de los eventos formados en el Pacífico tienden a alejarse rápidamente de las costas del país. Los que logran salirse del movimiento general dirigiéndose a México, alcanzan intensidades importantes como huracanes que producen efectos de impacto inmediato y con lluvias e inundaciones menos significativas.

REFERENCIAS

- Alexander, D. "Natural disasters" New York: Chapman & Hall, Inc. 1993.
- Aparicio, J. "Inundaciones: la otra cara de la moneda". Tlaloc, Vol. V, No. 11, pp. 15 – 20, 1998.
- Arreguín-Cortes, F., R. Domínguez-Mora, F. Luna-cruz, "Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010". Tecnología y ciencias de agua. Vol. V, Núm. 3 pp. 5-32, 2014.
- Bravo, C. "Reseña del huracán Patricia del Océano Pacífico". Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional., 2015.
- Bravo, C. "Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2015", Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2016.
- Capurro, L. "Huracanes, tifones, baguios, willy – willies y ciclones" Avance y Perspectiva. Vol. (20), pp. 221-233, 2014.
- Cardona, O. "La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesarias para la gestión". Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos. Bogotá: CEDERI, Universidad de los Andes. 1996.
- CENAPRED, "Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México: Atlas nacional de riesgos de la República Mexicana". Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de prevención de Desastres. México, 2014, p. 232.
- CENAPRED, "Diagnóstico de Peligros e identificación de Riesgos de Desastres en México", Capítulo 3 Riesgos hidrometeorológicos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2001, pp. 105-148.

- CONAGUA, “Inventario Nacional de Obras de Protección Contra Inundaciones en Cauces Naturales”. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado. Subgerencia de Obras de Protección en Ríos. México, 2008.
- Díaz, J. “Reseña de la tormenta tropical “Matthew” del Océano Atlántico”. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. 2010.
- García, N., K. Méndez, R. Reyes, R. Marín, “Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2013”. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Coordinación Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. p. 82, 2015.
- García, N., K. Méndez, S. Nava, F. Vázquez, “Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2014”. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Coordinación Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. p. 66, 2016.
- García, N., K. Méndez, S. Nava, F. Vázquez, “Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2015”. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Coordinación Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. p. 92, 2017
- García, N., R. Marín, K. Méndez, N. Troncoso, “Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2010”. Serie Impacto socioeconómico de los desastres en México No. 12. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Coordinación Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. p. 159, 2012.
- García, N., R. Marín, K. Méndez, N. Troncoso, “Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2011”. Serie Impacto socioeconómico de los desastres en México No. 13. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Coordinación Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. p. 403, 2013.
- García, N., R. Marín, K. Méndez, N. Troncoso, R. Reyes, “Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2012”. Serie Impacto socioeconómico de los desastres en México No. 14. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Coordinación Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres. p. 296, 2014.
- González, J. “México, vulnerable ante los desastres naturales” Portada. Construcción y Tecnología en Concreto, pp. 16:22, 2016.
- Hernández, A., C. Bravo, J. Díaz, “Reseña del Huracán Karl del Océano Atlántico”. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. 2010.
- Hernández, A., M. Rosengaus, “Análisis de la temporada de ciclones tropicales 2011”. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2012.
- Hernández, A., M. Rosengaus, “Análisis de la temporada de ciclones tropicales 2010”, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2011,
- Hernández, M., E. Azpra, G. Carrasco, O. Delgado, F. Villicaña, “Los ciclones tropicales en México”. Temas selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía. UNAM. 2001,
- Lavell, G. “Gestión de riesgos de desastres asociados con la variabilidad climática y el fenómeno ENSO en particular”. Consideraciones generales y apuntes conceptuales. Documento de trabajo. IAI-LA RED, 2002.
- Ovsei, M. “Desastres y protección civil. Fundamentos de investigación interdisciplinaria”. UNAM. México, 1996, pp. 41-44.
- SEGOB, “Impacto Socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2013”. Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, 2014, p. 82.
- SEGOB, “Sistema de alerta temprana para ciclones tropicales (SIAT CT)”. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de protección Civil. México. 2018.

WMO, “The role of the World Meteorological Organization in the International Decade for Natural Disaster Reduction”. World Meteorological Organization, Report No.WMO-745. Geneva, 1990.

Como citar este artículo:

Molina-Aguilar, J., Gutiérrez-López, A. (2020). Daños económicos y sociales por huracanes e inundaciones en México: periodo de 2010 a 2015. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 67-77. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Diez años de investigaciones en cubiertas vegetadas de tipo extensivo. Una síntesis de los resultados obtenidos

Ten years of research on green roof extensive type. A synthesis of the results obtained



Rosatto, H*., Moyano, G. P.; Cazorla, L.; Meyer, M.; Laureda, D.; Pérez, D.

Recibido: 11/07/2019

Bargiela, M.; Gamboa, P.; Olivieri, A.; Sbarra, G.; Aulestia, M.; Epstein, Y.

Aceptado: 29/08/2020

Viceconte, F.; Simonyan, M.; Requejo, I. M.; Daniel, A.C.; Miranda, B., Rocca C.

*Autor de correspondencia

Resumen

Las Cubiertas Vegetadas (CV), al ser una de las prácticas de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS recomendadas internacionalmente, pueden ser un recurso beneficioso, para la urbanización creciente, a la que Argentina no es ajena. En este trabajo se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en los últimos diez años de investigación en CV, destacando los datos hallados para el sitio de estudio.

Palabras clave: Techos Verdes, Retención hídrica, Calidad de Agua.

Abstract

Green roofs (GR), is one of the SUDS practices recommend all around the world. This positive resource can be use for the growing urbanization, like Argentinean. This paper presents a synthesis of the results obtained in the last ten years of research at GR, highlighting the data found for the study site.

Keywords: Green Roof, Water retention, Quality of water.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial y de las urbanizaciones ha conllevado a una mayor presión sobre los recursos naturales y en algunos casos la degradación de parte de ellos. Los cambios producidos en un contexto de cambio climático cada vez más acentuado, ha puesto en peligro la resiliencia de los ecosistemas naturales y humanos. El fuerte incremento que ha experimentado tanto la población mundial como las actividades productivas ha generado una demanda y presión creciente por los recursos hídricos. Actualmente más del 50% de la humanidad vive en ciudades, y se espera que este porcentaje aumente hasta casi el 70% para el 2050 (Berroeta y Gironás, 2019).

La urbanización se define como el crecimiento físico de las áreas urbanas. Este crecimiento determina (entre otros factores), el aumento de la impermeabilización. Esta situación altera el ciclo hidrológico natural y el hidrograma de crecida en cuencas en proceso de urbanización se va modificando, presentando caudales pico más altos y tiempos de ascenso más cortos a medida que aquella avanza (Rosatto, 2016). Perahia et al. (2016), menciona que, con el objeto de vincular la problemática de las inundaciones con su transformación territorial, se han considerado algunas soluciones sustentables impulsadas desde las administraciones locales que fueron propuestas para compensar el incremento de las superficies impermeables, los mayores caudales de agua de lluvia, y el riesgo de inundaciones en el marco de una planificación territorial integrada. En la hidrología urbana actual, el manejo del drenaje, además del sistema de alcantarillado tradicional existente, propone una serie de medidas que tratan de trabajar sobre el escurrimiento superficial de una manera integrada. Esta serie de prácticas suelen agruparse bajo la denominación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sustentable o SUDS (Rosatto et al., 2018).

Entre las prácticas agrupadas bajo la denominación de SUDS, se encuentran las Cubiertas Vegetadas (más conocidas como Green Roofs). A estas Cubiertas se les atribuye la posibilidad de disminuir el escurrimiento superficial al retener parte de la precipitación y disminuir o retardar el caudal pico. En función a lo anteriormente expuesto, nuestro grupo de investigación inició, hace 12 años, el estudio de los posibles beneficios ambientales que las Cubiertas Vegetadas (CV) podrían brindar para nuestro sitio de

estudio: La Ciudad de Buenos Aires. Al comenzar nuestro estudio, se nos plantearon una serie de preguntas:

¿Qué tipo de Cubierta Vegetada sería la más apropiada para Buenos Aires: ¿Extensivas o Intensivas?

¿Cuál sería la mejor CV para los edificios construidos en función a la capacidad portante de los mismos y del peso de la CV?

¿Cuál sería la manera más apropiada para que esta tecnología fuera adoptada?

¿Qué tipo de vegetación y sustrato serían los apropiados?

¿Qué beneficios ambientales puede aportar la CV en el contexto de nuestro estudio?

1.1 Cubierta Intensiva

Los sistemas intensivos son aquellos que permiten el desarrollo de vegetación de gran porte, donde el espesor del sustrato es de más de 15 centímetros. Presentan unas condiciones de distribución y aprovechamiento comparables a las de cualquier jardín al aire libre. Debido a la gran superficie de evaporación de las plantas, las cubiertas intensivas requieren riego. Estos sistemas tienen un alto costo de implementación y mantenimiento, y algunos de los materiales no se consiguen aún en el mercado argentino. La estructura necesaria para soportar el peso de dichos sistemas es costosa, dado que ésta cubierta suele tener un peso superior a los 200 kg por m² en seco (en húmedo una cubierta que pesa 210 kg por m², puede llegar a pesar 325 kg por m²).

1.2 Cubierta Extensiva

Un sistema extensivo consiste en la plantación en la cubierta de un tipo de vegetación natural que requiere un mantenimiento mínimo para su desarrollo. La capa de sustrato no supera los 15 centímetros, pudiendo ser (como menciona la bibliografía, ver debajo) menos a 10 centímetros, suficientes para el soporte de las especies vegetales más rústicas. Los materiales con los que están construidos son más simples y su obtención en el mercado es razonablemente sencilla. Ésta cubierta posee un peso de 80-200 kg/m² aproximadamente, su variación reside en la cantidad y variedad del sustrato a utilizar (al igual que en el caso anterior varían su peso en húmedo, por ejemplo, de 80 kg/m² pasa a 120 kg/m² en húmedo o de 140 kg/m² a 220 kg/m² en húmedo).

En función de lo expuesto, nuestros primeros análisis de la bibliografía y de las construcciones en la ciudad de Buenos Aires, se estableció que, para la mayoría de los edificios construidos, las cubiertas de tipo extensivo son las adecuadas, quedando las de tipo intensivo para edificios a construirse. Para responder a los demás interrogantes, decidimos estudiar en profundidad las CV de tipo extensivo, tratando de determinar un tipo de CV (extensivo) que resultara en el menor peso posible, la vegetación más resistente en función a su adaptabilidad (sobre todo en épocas de altas temperaturas y bajas precipitaciones) y que además resultara de bajo costo en el tiempo (sin mantenimiento o mínimo); estimando que esto permitiría una mayor adopción de la tecnología. Ligado a la adopción y a su mejor difusión, también comenzamos a estudiar los beneficios ambientales que la bibliografía reporta para las CV, pero tratando de determinar para las condiciones locales, como se manifestaban y en qué magnitud estos servicios. El objetivo de este trabajo es presentar una serie de resultados obtenidos, en el estudio de CV, en los últimos diez años, a partir de los proyectos de Investigación financiados por la UBA:

UBACyT G036, UBACyT 20020100100539, UBACyT 20020130100752BA y UBACyT 20020170100748BA.

2. METODOLOGÍA

En estos diez años de estudios, se analizaron cubiertas extensivas sin mantenimiento con distintos tipos de sustratos, distintos tipos de vegetación implantada, aportes a la reducción del escurrimiento superficial urbano (a partir de la capacidad de retención de la CV) y la calidad de agua que entregan las CV al sistema pluvial urbano. Los estudios se establecieron en parcelas de simulación de CV (del tipo propuesto por Forrester et al., 2006), donde el sustrato se distribuyó en capas desde la zona más baja hacia la superficie, colocando los más gruesos debajo y disminuyendo la granulometría hacia la superficie siendo la capa orgánica la superior sobre la que se implanta la vegetación. Este esquema se adoptó por considerarse el más parecido a la estratificación de un suelo natural.

2.1 Sustratos

En los ensayos se priorizaron sustratos que fueran fáciles de conseguir localmente a fin de conocer su desempeño. De los sustratos estudiados el que mostró el mejor comportamiento fue el siguiente (ordenado

de abajo hacia arriba): Granza (piedra partida) (4 cm). Minileca (arcilla expandida) (3 cm). Arena de textura gruesa (tipo oriental) (4 cm). Sustrato Orgánico (5 % de lombricompost; 20 % de turba blanca y 75 % compost orgánico) (4 cm).

2.2 Vegetación

Se estudiaron distintos tipos de vegetación, desde plantas adaptadas a la sequía como las crasas hasta "césped". Las que mejor resultado presentaron (en combinación con el sustrato arriba mencionado), en cuanto a su capacidad de retención del agua de lluvia fueron: *Sedum pachyphyllum*, *Sedum spurium*, *Carpobrotus edulis*, *Carpobrotus Acinaciformis*. Las dos últimas presentan una muy buena alternativa para zonas costeras.

2.3 Calidad de Agua

Con el objeto de estudiar si estas cubiertas actúan como fuente o sumideros de contaminantes se establecieron una serie de recipientes conectados al drenaje de cada parcela, que recogieron la totalidad del agua drenada ante cada lluvia, también se colectó en el testigo. Se midió en el agua de drenaje pH, conductividad eléctrica (CE), para estimar el contenido de sólidos totales disueltos, sólidos totales en suspensión, En las muestras filtradas se determinaron por métodos estandarizados P reactivo soluble y C orgánico disuelto. Asimismo, ante la posibilidad de que la CV pudiera captar contaminantes atmosféricos, que luego terminen en el agua drenada, también se estudió la presencia de Plomo (Pb). A partir de los resultados obtenidos respecto a los contaminantes atmosféricos, decidimos establecer un nuevo ensayo (actualmente en funcionamiento), para establecer el rol de las CV en la fito-estabilización de contaminantes atmosféricos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comportamiento de las CN ante las precipitaciones

Los resultados se expresan en % de retención respecto del Testigo. Se ordenaron, de menor a mayor, según la cantidad de precipitación caída. Se distribuyeron en intervalos de aprox. 20 mm, se determinó el porcentaje de agua retenida en tratamientos sin ningún tipo de mantenimiento y otras con mantenimiento mínimo (control manual de malezas) y los datos se expresan en la tabla 1.

Tabla 1: Porcentaje de retención de las parcelas respecto del Testigo. (Rosatto et al., 2015).

TRATAMIENTO (T)	PRECIPITACIÓN (en mm)				
	0 – 20	21 –41	42 – 60	61 –80	> 90
Sedum pachyphyllum. Sin mantenimiento. (T1)	100 %	65 %	33 %	30 %	16 %
Sedum pachyphyllum. Con mantenimiento. (T2)	100 %	67 %	39 %	37 %	22 %
Sedum spurium. Sin mantenimiento. (T3)	100 %	67 %	35 %	31 %	21 %
Sedum spurium. Con mantenimiento. (T4)	100 %	63 %	31 %	29 %	16 %
Carpobrotus edulis. Sin mantenimiento. (T5)	100 %	68 %	35 %	38 %	20 %

Como mencionan Rosatto et al. (2015), para intervalos de lluvias entre 0 y 20 mm el porcentaje retenido es del 100 % en todas las especies analizadas con y sin mantenimiento. Porcentajes de retención similares fueron reportados por Rosatto et al. (2013), pero para rangos de lluvia mayores y mayor profundidad de sustrato. Miller (2001) y FLL (2002), para la misma profundidad de sustrato reportan porcentajes de retención del 100 %. Los mismos autores, detallan que para intervalos de lluvias entre 21 y 41 mm los porcentajes de retención rondan entre el 63 % y 68 %. Estos porcentajes coinciden con los reportados localmente por Rosatto et al. (2010 y 2013) e internacionalmente por Moran et al. (2004) y Tanner et al. (2004). Nuevamente Rosatto et al. (2015), reportan que: al registrarse lluvias entre 42 y 60 mm se observan porcentajes de retención que varían entre el 31 % y 39 %. Dunnet (2008) y Johnston et al. (2004), reportan porcentajes cercanos a los aquí hallados, pero con leves diferencias en el establecimiento de sus ensayos. Continuando con el siguiente rango, los autores reportan que para el rango de lluvias registradas de entre 61 a 80 mm el porcentaje de retención se comparó en forma similar al intervalo anteriormente analizado, aunque con valores levemente menores (25 % al 38 %). Finalmente, para las precipitaciones mayores a 90 mm, el porcentaje de retención varía entre 16 % y 22 %. Similares valores fueron determinados por Rosatto et al. (2013), y también fueron reportados por Connelly y Lui (2005). La tendencia observada, va en línea con lo reportado por la bibliografía, en el sentido de que los porcentajes de retención de las CV, disminuyen en función del aumento de la precipitación registrada.

3.2 Calidad del Agua drenada por las CV

El agua percolada, en un sistema de cubiertas naturadas, previo paso por el sistema de desagüe pluvial culmina generalmente en cuerpos de agua que deben ser preservados, por eso es necesario reducir la presencia de sustancias que puedan alterarlos (Mazzeo y Rosatto, 2013; Moyano, et al., 2018). En algunos casos las CN se convierten en fuente de contaminantes, aunque no sustancial. Especialmente después de eventos de lluvias fuertes se presenta un aumento de las concentraciones de fosfatos, materia orgánica y metales (Teemusk y Mander, 2007). Lo antedicho nos motivo a estudiar qué calidad de agua entregaban las CV, con el fin de poder establecer si existe la necesidad de instaurar mecanismos de tratamientos de estas aguas drenadas o en qué casos lo sería. Las determinaciones de sedimentos en suspensión en el agua de drenaje mostraron pérdidas importantes de sólidos durante las precipitaciones al inicio del ensayo, lo que fue disminuyendo a medida que transcurrían las precipitaciones. Se observó que las parcelas implantadas con Sedum fueron las que siempre presentaban el menor contenido de sólidos en el agua de drenaje. También ocurrió lo mismo con el Carbono orgánico disuelto y los coloides orgánicos. En todos los tratamientos se observó pérdida de sales cada vez menor, producto del lavado de las primeras precipitaciones. El pH de las parcelas fue acidificándose con el tiempo no observándose diferencias significativas entre tratamientos en el agua de cada precipitación. Las concentraciones de fósforo reactivo soluble PRS no dieron diferencias significativas, la literatura ha observado después de eventos de lluvias fuertes que se presenta un aumento de las concentraciones de fosfatos, materia orgánica y metales; por lo que se continuó con las mediciones haciendo hincapié en la presencia de eventos

importantes. En efecto, Moyano et al. (2018), mencionan que según exponen López et al. (2013), al analizar los valores de pH, CE y sólidos totales disueltos (STD) es importante considerar las condiciones atmosféricas previas al momento del muestreo. Las características físico-químicas del agua de lluvia dependen de las de la atmósfera, que se encuentran definidas por las emisiones de distintas fuentes. Estas no son estáticas, variando temporal y espacialmente, lo que provoca una gran variabilidad de las condiciones atmosféricas. Por lo tanto, la composición de la lluvia cambia también a lo largo de un mismo evento de lluvia. Según afirman los autores: “Así lo indican diferentes trabajos que muestran un enriquecimiento significativo de elementos químicos en las primeras etapas iniciales de los eventos de precipitación, y una dilución de la concentración química a medida que la lluvia persiste y la atmósfera se depura. Esta evolución temporal de la composición química durante un mismo evento depende en gran medida de la dinámica de las tormentas y de cada especie química en particular. De esta manera, la magnitud y la frecuencia de las precipitaciones influye sobre los flujos de deposición química y los tiempos de residencia de los elementos en la atmósfera”. Moyano, Rosatto y Bargiela (2018), reportaron en su estudio más reciente, para eventos hídricos importantes, que el pH ha sido mayor en todos los tratamientos de las muestras recolectadas ante una precipitación de 47 mm en un día, en comparación con la de 92 mm en un día, resultando el más básico el tratamiento Sedum sin mantenimiento. En cuanto a los STD, con la lluvia de 92 mm, se observó una tendencia a presentar mayor contenido de STD en las macetas desnudas (Testigo), en tanto con 47 mm, el contenido más elevado se presentó en los tratamientos con mantenimiento. Los autores comentan que, tomando como premisa lo expuesto por López et al. (2013), las diferencias observadas en los valores registrados de pH y STD en el agua de lluvia recolectada en el tratamiento Testigo en cada fecha de muestreo, se explican a partir de las características atmosféricas previas al evento de precipitación y el volumen de agua precipitada. Respecto de la presencia de Plomo en agua de lluvia reportada por Moyano, Rosatto y Bargiela (2018), reportan que los datos registrados ante la lluvia de 92 mm, presentan una tendencia de mayor concentración en relación a los de 47 mm, salvo el caso del tratamiento testigo. A pesar de ello, no se observan diferencias significativas entre las muestras en ambas fechas de muestreo.

4. CONCLUSIONES

En estos diez años de estudios, más allá del resumen de resultados expuestos en este trabajo, lo que nos ha quedado claro, es que las condiciones locales (clima, calidad del aire, distribución y cantidad de espacios verdes, estructura de la urbanización, entre otras), de la vegetación (adaptación y resistencia a la sequía) y sustratos utilizados (fundamentalmente su peso y capacidad de absorción), definen en gran medida el éxito de la implantación y supervivencia de las Cubiertas Vegetadas de tipo extensivo. Su adopción dependerá, además de lo expuesto en el párrafo anterior, de su nulo o mínimo costo de mantenimiento y del menor costo posible en su construcción. A esto ayudaría en gran medida que los usuarios y los gestores urbanos conocieran y valoraran los servicios ambientales que las CV pueden brindar.

4.1 ¿Cómo continuamos?

Nuestro equipo comenzó estudiando la capacidad de retención y retardo (en el escurrimiento hacia los desagües pluviales) que presentaban las CV ante las precipitaciones y actualmente, estamos ampliando el estudio a otros beneficios ambientales que pueden brindar como: su capacidad de disminución térmica (en los edificios sobre los que se construyen) y la de captación de contaminantes atmosféricos del aire. También consideramos que es necesario profundizar en el objetivo de lograr “la mejor Cubierta Vegetada de tipo extensivo” para nuestra ciudad, por eso, en este año 2019, hemos reemplazado la capa de arcilla expandida por “piedra pómez”, en función de aumentar su capacidad de retención y alivianar su peso, pero aún no contamos con datos publicables sobre el éxito o no de este cambio. Otro estudio que estamos comenzando en este año, es la incorporación de hongos micorrízicos arbusculares al sustrato orgánico (HMA). La bibliografía menciona como una de las propiedades de los HMA, su capacidad de inmovilizar y secuestrar metales, así como la de aumentar la resistencia a la sequía de la vegetación implantada. De comprobarse estos beneficios para nuestro sitio de estudio, este agregado, podría representar una mejor adaptabilidad de la CV, así como un aporte en la mejora de la Calidad del Aire “urbano”.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a la Universidad de Buenos Aires, dado que sus subsidios a nuestra investigación nos

han permitido continuar en una línea financiada sin tener que preocuparnos por la consecución de otros fondos. Esto nos ha permitido profundizar en el tema excediendo los plazos habituales. En segundo término, a todos los que a través de estos últimos diez años han colaborado con distintos aspectos de esta investigación, que exceden ampliamente los autores

de este artículo. Finalmente, al Dr. Carlos Berroeta Jefe de Investigación y Relaciones Científicas, Aguas Andinas, Chile y Coordinador Regional Grupo de Trabajo Aguas Urbanas PHI-LAC, sin cuya invitación a realizar un aporte en la temática, el presente artículo no existiría.

REFERENCIAS

- Connelly, M. and K. Lui. 2005. Green roof research in British Columbia – An overview [PDF 1MB]. In: Proceedings 3rd Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards & Trade Show, Washington, DC. The Cardinal Group, Toronto.
- Dunnett, N.; Nagase, A.; Booth, R. y Grime, P. 2008. “Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments”. *Urban Ecosyst* 11. Pp. 385 – 398.
- FLL. 2002. “Richtlinien für die Planung”. *Ausführung und Pflege von Dachbegrünung*. Bonn. 95 p.
- Forrester, K.; Jost, V.; Luckett, K.; Morgan, S.; Yan, T. and Retzlaff, W. 2006. “Evaluation of Storm Water Runoff from a Midwest Green Roof System”. Illinois State Academy of Science Annual Meeting, April 21, 2006, Chicago. Published by Green Roof Environmental Evaluation Network.
- Johnston, C.; McCreary, K. and Nelms, C. 2004. “Vancouver Public Library Green Roof Monitoring Project”. *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Portland, Oregon. Publisher: Green Roofs for Healthy Cities. 13 p.
- López, María L.; Asar, María L.; Ceppi, Sergio A., Bürgesser, Rodrigo E. y Ávila, Eldo E. 2013. “Evolución de la concentración de elementos inorgánicos en el agua de lluvia”. Pag. 423 – 440. En: *Contaminación atmosférica e hídrica en Argentina: contribuciones de la IV Reunión Anual PROIMCA y II Reunión Anual PRODECA 2013*. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza, 2013. 769 p.
- Mazzeo, Nadia y Rosatto, Héctor. 2013. “Cubiertas Vegetadas: Incidencia del aporte de un Subsidio de Energía (Fertilizante) en la Retención”. Informe de Beca Estímulo UBACyT. CABA, Argentina. 10 p.
- Miller, C. 2001. “Use of Vegetated Roof Covers in Runoff Management”. Memorandum, Roofscapes Inc. 5 p. USA.
- Moran A., B. Hunt, G. Jennings. 2004. “Greenroof research of stormwater runoff quantity and quality in North Carolina”. NCSU Water Quality Group Newsletter, NC State University, USA.
- Moyano Gabriela Patricia; Hector Gustavo Rosatto y Martha Fidela Bargiela. 2018. “Cubiertas Vegetadas: su Rol en la Fitoestabilización de Contaminantes Atmosféricos”. VI Congreso de Ciencia y Arte del Paisaje: “Entornos desde el Interior”. Organizado por la Academia Mexicana de Paisaje. Guadalajara México. 17 p.
- Perahia, R.; Rosatto, H.; Meyer, M.; Waslavsky, A.; Viceconte, F.; Laureda, D.; Gamboa, P. y Moyano, G. 2016. “Drenajes Urbanos, Propuestas Locales Sustentables”. Publicado en el Libro Electrónico en CD-Rom, de Compilación Científica: Planificación Territorial, Desarrollo Sustentable y Geodiversidad. Pág.: 1264-1274. Editores: 525 Aniversario del Encuentro entre Dos Mundos Huelva-América - Servicio de Publicaciones de la Exma. Diputación de Huelva, © Juan Antonio Márquez Domínguez, Perú. ISBN: 978-84-8163-557-7.
- Rosatto Héctor, Gabriela Moyano, Laura Cazorla, Daniel Laureda, Maia Meyer, Paula Gamboa, Martha Bargiela, Cesar Caso, Gustavo Villalba, Daniel Barrera, Laura Pruzzo, Luis Rodríguez Plaza, Alejandra Oliveri, Agustina Waslavsky, Patricia Hashimoto, Diana Kohan. 2015. “Cubiertas Vegetadas de tipo “Extensivo” - Eficiencia en la retención del agua de lluvia de distinto tipo de Vegetación Implantada”. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Tomo XLVII. Issue 2, Pp. 123 – 134.

- Rosatto, H. G. 2016. “Aportes de las cubiertas vegetadas de tipo “extensivo” en la posible mitigación de algunas problemáticas resultantes del cambio climático y del crecimiento urbano en la ciudad de Buenos Aires (Argentina)”. Tesis de doctorado, Universidad de Almería, Almería, España. 128 p.
- Rosatto, H.; Laureda, D.; Pérez, D.; Barrera, D.; Meyer, M.; Gamboa, P.; Villalba, G.; Friedrich, M; Bargiela, M; Rodríguez Plaza, L.; Calvo, G.; Miranda, M.; Iñigo, M.; Quaintenne, E. 2010. “Eficiencia de la retención hídrica de las cubiertas vegetadas”. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XLII. Issue 1, Pag. 213-219. Editorial: Centro de Ediciones Académicas, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. ISSN: 0370 - 4661.
- Rosatto, H.; Perahia, R.; Borello, L.; Gamboa, P.; Laureda, D.; Meyer, M.; Moyano, G.; Cazorla, L.; Pérez, D. y Saracho F. 2018. “Implementación de una Práctica SUDS para disminuir el Escurrimiento Superficial en CABA”. Proceedings del VII Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua compilado por Marta Elena Rodríguez - 1a ed. Sima Editora. ISBN 978-987-1930-43-2 1 Abastecimiento de Agua 2 Recursos Hídricos. CDD 333.91. Córdoba-Argentina.
- Tanner, S., & Scholz-Barth, K. 2004. “Green Roofs”. Federal Technology Alert. Energy Efficiency and Renewable Energy. Department of Energy, EUA.
- Teemusk, Alar y Mander, Ülo. 2007. “Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events”. Ecological Engineering, 30: Pp. 271-277, ISSN: 0925-8574..

Como citar este artículo:

Rosatto, H., et al., (2020). Diez años de investigaciones en cubiertas vegetadas de tipo extensivo. Una síntesis de los resultados obtenidos. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 78-84. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental
para América Latina y el Caribe

Seguridad hídrica y gobernanza en el abastecimiento de agua. Déficits y desarrollo de la capacidad institucional para enfrentar los desafíos sanitarios. caso: provincia de Santa Fe (Argentina)

Water security and governance in water supply. Deficits and development of institutional capacity to face sanitation challenges. case: Santa Fe province (Argentina)

Luis Antonio Traba*^{1,3}, Marta del Carmen Paris^{2,3}, Antonio Paz González⁴

Recibido: 19/09/2020

Aceptado: 30/09/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

Una de las dimensiones más importantes de la seguridad hídrica de la población es el abastecimiento de agua potable. Este concepto plantea en cierta medida la esperanza de que la sociedad alcance metas ideales o logre un estado deseado en ese aspecto. La seguridad hídrica se define como la capacidad de una población para salvaguardar el acceso a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable, que permita sustentar tanto la salud humana como la del ecosistema, basándose en las cuencas hidrográficas, así como garantizar la protección de la vida y la propiedad contra riesgos relacionados con el agua inundaciones, derrumbes, subsidencia de suelos y sequías. En este trabajo se presenta la seguridad hídrica y gobernanza en el abastecimiento de agua, como un déficit y desarrollo de la capacidad institucional para enfrentar los desafíos sanitarios. Es estudio de caso se presenta en la provincia de Santa Fe (Argentina).

Palabras clave: Seguridad hídrica, agua potable, gobernanza, capacidad institucional.

Abstract

One of the most important dimensions of water security for the population is the supply of drinking water. This concept suggests to some extent the hope that society will reach ideal goals or achieve a desired state in this regard. Water security is defined as the ability of a population to safeguard access to adequate quantities of water of acceptable quality to sustain both human and ecosystem health, based on watersheds, as well as to assure the protection of life and property against water-related hazards such as floods, landslides, soil subsidence, and droughts. This paper presents water security and governance in water supply, as a deficit and institutional capacity building to address health challenges. The case study is presented in the province of Santa Fe (Argentina).

Keywords: Water security, drinking water, governance, institutional capacity.

- 1 Observatorio de Servicios Sanitarios (OSS). Universidad Nacional del Litoral (UNL). Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH). Santa Fe, Argentina. ltraba@fich.unl.edu.ar
- 2 Centro de Hidrología y Gestión del Agua (CHyGA). Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH). Universidad Nacional del Litoral (UNL). Santa Fe, Argentina. parismarta@gmail.com
- 3 Cátedra UNESCO Agua y Educación para el Desarrollo Sostenible. Universidad Nacional del Litoral (UNL). Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH). Santa Fe, Argentina. ltraba@fich.unl.edu.ar
- 4 Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña. La Coruña, España. antonio.paz.gonzalez@udc.es

1. INTRODUCCIÓN

Una de las dimensiones más importantes de la seguridad hídrica de la población es el abastecimiento de agua potable. Este concepto plantea en cierta medida la esperanza de que la sociedad alcance metas ideales o logre un estado deseado en ese aspecto. UNESCO (2012) la define como la capacidad de una población para salvaguardar el acceso a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable, que permita sustentar tanto la salud humana como la del ecosistema, basándose en las cuencas hidrográficas, así como garantizar la protección de la vida y la propiedad contra riesgos relacionados con el agua inundaciones, derrumbes, subsidencia de suelos y sequías. En el mismo sentido, diversos autores como Ávila García (2009) o Peña (2014), plantean además que seguridad hídrica se puede resumir la situación integradora en la que la sociedad resume todas aquellas expectativas y demandas que dirige hacia el recurso agua.

En un contexto complejo en términos tanto de actores e intereses como jurisdicciones, territorios y responsabilidades, esto se vuelve una meta difícil de alcanzar solo con buenas intenciones. Precisamente esa complejidad viene de la conjunción de las necesidades y conflictos que se pueden distinguir según los usos principales del agua y de las instituciones que deben satisfacerlas a todo nivel: doméstico (alimentación, lavado, higiene), público (hospitales, colegios, limpieza de calles, fuentes públicas, riego de jardines), industria, agricultura, ganadería, generación de energía eléctrica, comunicación fluvial, navegación, deporte, esparcimiento, etc.

Precisamente en esta dimensión, la pandemia del COVID-19 concentra la atención en la seguridad del abastecimiento de agua potable para atender las necesidades de bebida, alimentación e higiene de la comunidad. Todas las recomendaciones de lavado de manos e higiene domiciliaria serán infructuosas o de dudosa efectividad si no se cuenta con agua segura, cuali y cuantitativamente.

La Provincia de Santa Fe tiene realidades muy diferentes, no sólo en lo que refiere a la disponibilidad de agua de calidad y cantidad apropiada para consumo humano, sino también en lo que refiere a la infraestructura y a la gobernanza que permite acceder al agua potable. Ciudades como Santa Fe, Rosario, Reconquista se abastecen con agua del sistema río Paraná, mientras que gran parte de las localidades de la provincia lo hace con agua

subterránea (Figura 1). En el último caso hay zonas - especialmente en el oeste del territorio provincial- donde la disponibilidad del recurso está condicionada tanto en términos de volumen como de calidad debido a los altos contenidos de arsénico (superiores a 200 mg/L), salinidad, nitratos y sulfatos.

A modo de presentación de la Provincia se puede señalar que 3.5 millones de habitantes se distribuyen de manera muy poco homogénea en las 365 localidades que se encuentran en ella, donde por ejemplo solo en la ciudad de Rosario habitan 1.2 millones personas y en la ciudad de Santa Fe otras 500 mil. Pero también hay zonas urbanas, periurbanas, barrios privados o rurales, que no cuentan con estas redes de suministro. En esos casos, cada vivienda cuenta con perforaciones (pozos domiciliarios), que en general conviven con la amenaza de contaminación potencial de las obras de saneamiento in situ (pozos negros).

En lo que refiere a los aspectos de este problema que puedan definir un proceso de gobernanza, una evolución sucinta de los cambios producidos en el sector sirve para comprender en uno de sus aspectos, los numerosos déficits de capacidad institucional para gestionar el mismo:

- En los años 80's se crea la Dirección Provincial de Obras Sanitarias (DIPOS) a partir de la descentralización de Obras Sanitarias de la Nación (OSN).
- En los años 90's, siguiendo las políticas vigentes en el país se privatiza creando la empresa privada Aguas Provinciales de Santa Fe (APSF) a la que en la misma Ley Provincial de creación (Ley 11.220) se le asignan las principales 15 ciudades, dejando en el mismo estado a las restantes 350 localidades: cientos de prestadores de pequeña y mediana envergadura que cuentan con dos diseños institucionales básicos: las Cooperativas de Servicios Públicos y los Gobiernos Locales. Estos constituyen emprendimientos normalmente fuera de escala que llevan a cabo su proceso de producción con fuertes limitaciones en lo institucional que condicionan su desempeño técnico, económico y ambiental. Bajo el mismo instrumento legal se establecen los límites de potabilidad y se crea el Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ENRESS) que se ocupa entre otros aspectos de la vigilancia de la calidad del agua para que los

parámetros físico-químicos y microbiológicos luego de la potabilización y/o desinfección del agua por agregado de cloro.

- El fracaso de la privatización, tanto a nivel de la calidad del servicio como a la inversión en infraestructura, condujo a una virtual re-estatización a principios de la década pasada. Mediante la Ley Provincial 12.516, se crea

Agua Santafesinas SA (ASSA). Se trata de una sociedad mixta del Estado Provincial. La Ley 11.220 no ha perdido vigencia, pero si pertinencia, donde el Ente Regulador que crea sigue en funciones, casi como juez y parte y el resto de los actores siguen estando en segundo plano.



Figura 1. Provincia de Santa Fe (Argentina). Elaboración propia sobre la base del mapa de calidad de aguas del Ente Regulador de Servicios Sanitarios (ENRESS) y el mapa de tipo de climas de la Provincia de Santa Fe del Instituto Geográfico Nacional.

Ante esta realidad institucional y ambiental, el Gobierno de la Provincia, responsable jurisdiccional del servicio, desarrolló ciertas políticas de contención a nivel local, otorgando recursos aislados en sistemas de potabilización como osmosis inversa, pero sin resolver su impacto en los costos y en el ambiente por la no planificada disposición del rechazo salino que estas plantas de tratamiento generan, y tampoco la necesidad de cubrir la demanda de agua en términos de cantidad. La macro política en este rubro es el Plan de Grandes Acueductos, institucionalizada en 2006 por la Ley Provincial N° 12.668 creando la Empresa Santafesina de Grandes Acueductos

(SAPEM). Se trata de más de 5.000 km de tuberías repartidos en 11 subsistemas con una inversión total prevista de alrededor de 8.000 millones de dólares. La Figura 2 muestra el sistema proyectado y el avance actual. El esquema de manejo, decidido en forma centralizada sin participación de todos los actores, prevé la entrega del agua potabilizada al prestador local (cooperativa, municipio, comuna, etc.), pero sin muchas precisiones para su administración operativa y de costos. Esto ha provocado tales inconvenientes con los que el agua en definitiva no llega al usuario, ya que en algunos casos las localidades no se conectaron al sistema de

acueductos o tardaron en hacerlo y/o no están abonando regularmente por el servicio. De este modo la seguridad hídrica en materia de agua potable no se logra sólo con contar con el recurso e infraestructura, sino que es sustancial fortalecer su esquema de gobernanza. En este trabajo se realiza el análisis del

nivel de seguridad hídrica en el mencionado estado provincial y se definen líneas de acción para fortalecer a estos prestadores en un marco real de gobernanza del agua que permita alcanzar los logros del ODS 6.

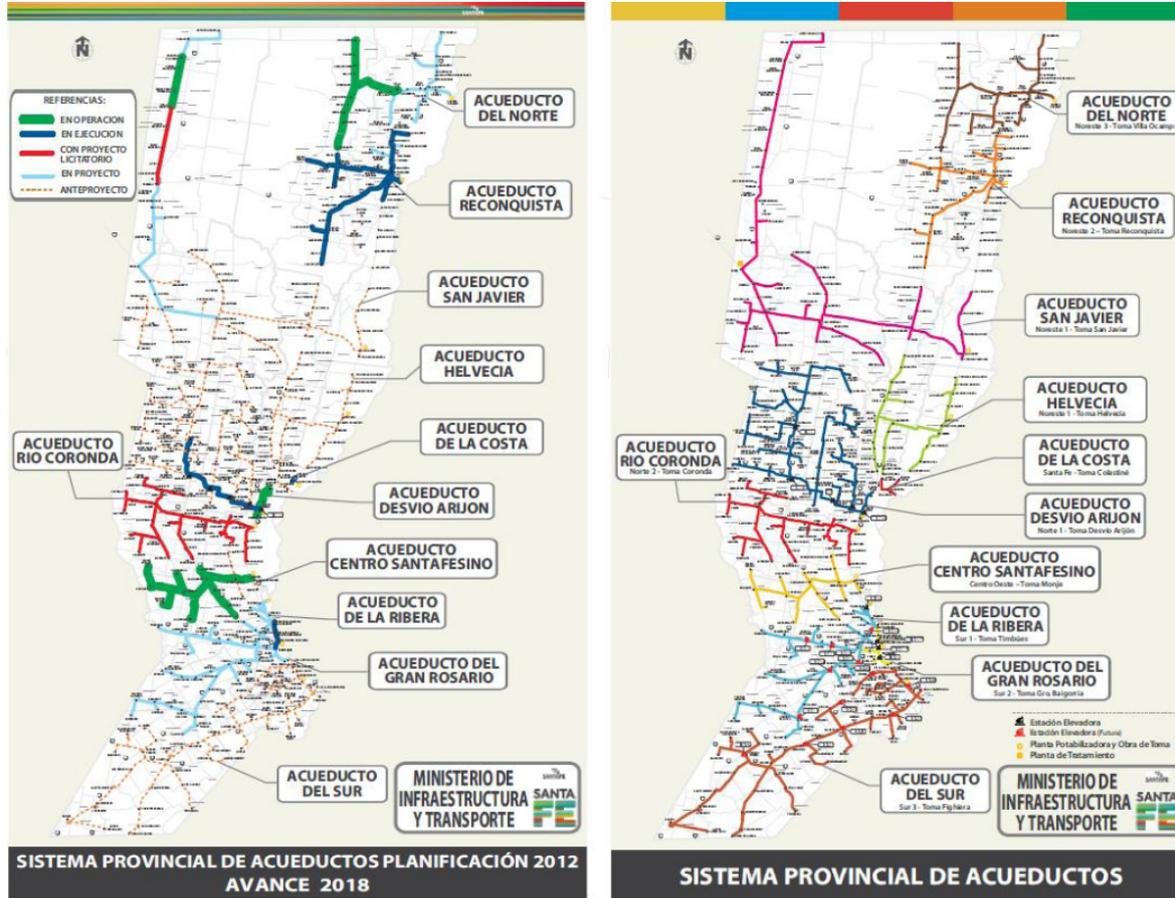


Figura 2. Sistema Provincial de Acueductos. Ministerio de Infraestructura y Transporte Gobierno de la Provincia de Santa Fe.

El esquema de manejo, decidido en forma centralizada sin participación de todos los actores, prevé la entrega del agua potabilizada al prestador local (cooperativa, municipio, comuna, etc.), pero sin muchas precisiones para su administración operativa y de costos. Esto ha provocado tales inconvenientes con los que el agua en definitiva no llega al usuario, ya que en algunos casos las localidades no se conectaron al sistema de acueductos o tardaron en hacerlo y/o no están abonando regularmente por el servicio. De este modo la seguridad hídrica en materia de agua potable no se logra sólo con contar con el recurso e infraestructura, sino que es sustancial fortalecer su esquema de gobernanza. En este trabajo se realiza el análisis del nivel de seguridad hídrica en el mencionado estado provincial y se definen líneas

de acción para fortalecer a estos prestadores en un marco real de gobernanza del agua que permita alcanzar los logros del ODS 6.

2. METODOLOGÍA

De acuerdo con Peña (2014) el estado deseado de la seguridad hídrica implica:

- Una disponibilidad de agua que sea adecuada, en cantidad y calidad, para el abastecimiento humano, los usos de subsistencia, la protección de los ecosistemas y la producción.
- La capacidad institucional, financiera y de infraestructura para acceder y aprovechar

dichos recursos de forma sustentable y manejar las interrelaciones y externalidades entre los diferentes usos y sectores, de manera coherente.

- Un nivel aceptable de riesgos para la población, el medio ambiente y la economía, asociados a los recursos hídricos.

Esto da lugar a un marco teórico multidimensional que, por la escasez de bibliografía de referencia en este tipo de prestaciones de servicios públicos, fueron definidas en este trabajo a partir de las temáticas que explican el caso o problemática en análisis.

Es así como, entonces, para conocer el estado de la seguridad hídrica en la Provincia de Santa Fe (Argentina) en materia de abastecimiento de agua potable, es necesario conocer la situación de los pequeños y medianos prestadores, e identificar las posibles líneas de acción en un marco de la gobernanza del agua que minimicen los niveles de riesgo en este sentido. Para ello se expone en primer término el esquema de relaciones inter-institucionales en el sistema entre los actores públicos y privados, luego se caracteriza la gestión del servicio en términos de su sostenibilidad ambiental, técnica y económica, señalando los déficits y capacidades institucionales responsables de esto en los prestadores, para finalmente identificar las líneas de acción.

Los factores observables en la realidad de los servicios sanitarios, como la insuficiencia de los marcos normativos, la fragmentación territorial y sectorial, la deficiente participación social y el divorcio de las políticas con la realidad, indujeron a recurrir al marco conceptual que provee la gobernanza. Vista tanto como proceso y como espacio de interacción entre el Estado y la sociedad, resultando en una construcción horizontal de políticas (mientras que la gobernabilidad es una inducción vertical el estado deseado de la gestión del agua.

Otra dimensión de la problemática es el enfoque sobre el manejo del agua como recurso, donde se ha recurrido a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), como vehículo para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Particularmente en Argentina, los Principios Rectores de la Política Hídrica consensuados por las Provincias Argentinas en el ámbito del Consejo Hídrico Federal (COHIFE), hablan de superar la gestión sectorial por la gestión Integrada, ambiental, económica, social y políticamente, descentralizada y participativa. Así también se pone de relevancia la dimensión ética y precisamente lo señalado sobre la

governabilidad mediante la construcción de consensos, tomando como referencia territorial la Cuenca, en tanto unidad de planificación y gestión.

Finalmente, se recurre a lineamientos teóricos sobre el modelo de gestión y el esquema jurídico-institucional que se puede observar en los prestadores. Por un lado, las Cooperativas, según Elgue (2006) son entidades “privadas” donde el Estado no tiene injerencia directa y tienen un carácter social y solidario, ergo apuntan a la mejor prestación del servicio, o los servicios, con la mira puesta exclusivamente en el usuario sin ánimo de lucro como lo sería una Empresa. Aquí aparece una ventaja competitiva alrededor de la responsabilidad con el socio-usuario y de la mirada colectiva sobre las decisiones y por lo tanto sobre el esfuerzo hacia la calidad. Asimismo, su autonomía de gestión facilita el manejo diario, pero también pone sobre la mesa permanentemente la sustentabilidad a partir de un necesario balance entre ingresos e ingresos. También se pone en debate la denominada “calidad percibida” por el usuario, en términos de las exigencias sobre un servicio que mantiene con el pago de la tarifa y que a la vez es dueño a partir del carácter institucional del prestador.

Por el otro están los Gobiernos Locales, que asumen la prestación subsumida generalmente en la centralidad de su estructura, cuando sería más interesante una cierta autonomía en función de identificar claramente los factores de eficiencia que se vienen detallando. Comparten con las cooperativas la endeblez institucional en cuanto a la capacidad de gestión del servicio y fundamentalmente se puede decir que ambas organizaciones pueden incluirse en el denominado paradigma pre-burocrático de división del trabajo. De acuerdo con Schein (1997) “las organizaciones que presentan este modelo de base clientelar o patrimonialista se caracterizan por una estructura centralizada. El poder se concentra en una figura alrededor de la cual priman los intereses políticos, económicos o sociales propios, en detrimento del interés público...”. Los esquemas pre-burocráticos, al estar fuertemente asentados en supuestos y en mecanismos basados en relaciones y lealtades, representan modelos organizacionales poco eficientes, con costos elevados y de bajo rendimiento en su actividad. Si bien la normalización y formalización en las organizaciones, incluyendo el ámbito de organizaciones públicas, ha sido un importante avance de racionalización, numerosas prácticas y valores se han mantenido y se mantienen aún hoy, en modalidades pre-burocráticas”.

A partir de este marco conceptual se llevó adelante la siguiente secuencia metodológica: 1) revisión histórica del marco legal e institucional del sector con el fin de poner en claro una situación no resuelta; 2) caracterización del sector sanitario, para exponer el escenario provincial actual en términos de prestadores y prestaciones; 3) examen de una muestra de cooperativas para conocer los detalles del servicio e identificar algunos indicadores de desempeño; 4)

aplicación adaptada del método SADCI (Sistema de Análisis y Desarrollo de la Capacidad Institucional) (Tobelem, 1993) para evaluar objetivamente el estado del sistema describiendo primero los Déficit de Capacidad Institucional (DCI) para luego dar lugar a las Estrategias de Desarrollo Institucional (EDI) (Traba et al., 2017). La Tabla 1 presenta las dimensiones originales del SADCI y las adaptadas para esta investigación.

Tabla 1. SADCI dimensiones originales y adaptadas. Fuente: Traba (2019)

Dimensiones originales	dimensiones adaptadas	Dimensiones originales	dimensiones adaptadas
	<ul style="list-style-type: none"> • Reglas del Juego • Relaciones Inter-Institucionales 	<ul style="list-style-type: none"> Entorno Político Institucional Entorno Económico Entorno Social Entorno Geográfico Entorno Tecnológico 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Organización Interna • Política de Personal • Habilidades Individuales 	<ul style="list-style-type: none"> Dimensión Organizacional Dimensión Operacional Dimensión Económico-Financiera Dimensión Jurídica 	

Cabe mencionar que la adaptación de las dimensiones del SADCI, es un emergente de un modelo de gestión para los prestadores bajo estudio, que fuera validado aplicándolo a un caso de estudio en particular como parte de esa investigación (Traba, 2019).

3. RESULTADOS

3.1 Evolución del marco legal e institucional del sector sanitario en la Provincia de Santa Fe

La evolución del sector sanitario en la Provincia de Santa Fe, cuya cronología fuera brevemente presentada en el apartado Introducción, fija la línea actual en la creación de ASSA, donde el gobierno instaura un modelo de gestión estatal con enfoque comercial, planteando de alguna manera una combinación entre los dos modelos que lo antecedieron, pero con mayor confusión porque no modifica el marco legal e institucional de la Ley 11.220. Se vuelve a la inversión estatal, pero se busca, sin lograrlo, la autosuficiencia operativa de la empresa en base a tarifas más ajustadas al consumo, con más subsidios directos del gobierno. Si bien a partir de la Ley de Aguas de la Provincia de Santa Fe (Ley Provincial 13.740) sancionada en 2018 aporta algunos elementos positivos, no resuelve la confusión general, con lo cual una nueva Ley de Saneamiento se presenta como una necesidad, donde por ejemplo se elimine el “área concesionada”, se revise el

régimen de control y se pregunte por la pertinencia del ENRESS -como ente regulador-, donde se establezcan pautas comunes para los regímenes tarifarios en las distintas tipos de prestaciones y considerar el Sistema de Acueductos como un actor más, determinante en muchos aspectos.

3.2 Caracterización del sector sanitario

Inventario de los modelos de gestión de los prestadores. Para comenzar este punto conviene contextualizar el servicio en el País, según el Gobierno Nacional para el 2015, la cobertura del servicio de agua potable era del 87% de la población y solo el 58% disponía de cloacas, de las cuales se estima que sólo entre el 15% y 20% de los efluentes reciben tratamiento (MIOPyV, 2017). La Tabla 2 muestra que, como sucede a nivel nacional, la mayoría de las localidades de la Provincia de Santa Fe es servida por un gran número de prestadores, como se dijo en nuestra Provincia una gran empresa (ASSA) sirve al 65% de la población en solo 15 localidades, mientras que una gran mayoría de entes menores atiende al resto. Esto produce desfasajes en varios sentidos, pero fundamentalmente desvía la atención de aquellos servicios de pequeña y mediana escala hacia el gran prestador de las mencionadas mayores localidades de la provincia. Esta situación traducida a los entes prestadores y sus modelos de gestión muestra según el ENRESS, 347 prestaciones de agua potable a cargo de distintos organismos y 80

de cloacas, números con los que este estudio tiene alguna disidencia expresada en la Tabla 3. Es necesario destacar también que, en 32 localidades, hay más de un prestador que se reparten los dos servicios referidos entre la Comuna o Municipio y la Cooperativa local y en otras es el único. Cabe mencionar que, junto con el servicio de agua potable,

el servicio de alcantarillado cloacal aporta su impacto tanto en lo social y económico como en lo ambiental, y que según Vera (2019), solo 93 de las 365 localidades cuentan con el servicio con un tratamiento asociado, con un porcentaje de cobertura en esas localidades del 65.2%.

Tabla 2. Prestadores de Servicios Sanitarios según el tamaño de la población asistida. Adaptado de: ENRESS

	Menos 10.000 Hab	10.000 a 100.000 Hab	Más 100.000 Hab
Prestadores			
Argentina	86 %	12 %	2%
Santa Fe	86 %	13%	1%
Población Urbana			
Argentina	33 %	25 %	42%
Santa Fe	13 %	22%	65%

Tabla 3. Prestadores de agua potable según formato institución. Adaptado de ENRESS

	Formato institucional	Informado por enress	Relevamiento propio
Comunales	188	189	54%
Cooperativas	126	129	36%
Municipales	30	24	9%
Vecinales	3	4	1%
	347		

Vale la pena un apartado para ahondar un poco más en el mencionado modelo de gestión vigente en los prestadores en la provincia, todos servicios de pequeña y mediana envergadura, cubriendo un espectro de unas 500 a 8.000 cuentas. El primero como se dijo es el modelo cooperativo. Se trata de entidades con ausencia de ánimo de lucro, basadas en la solidaridad, ayuda mutua y fraternidad, abierto a la incorporación de socios con una gestión democrática y participativa. Se observa una constante preocupación por la educación y los emprendimientos societarios. El modelo cooperativo termina siendo una respuesta satisfactoria a la incapacidad del Estado de llegar y donde el negocio no es rentable para un privado. El otro es el modelo de gestión local, donde en general se cuenta con un bajo nivel de desarrollo institucional, a partir la ya descrita gestión pre-burocrática, basada en una lógica informal entre el personal y en el que se puede esperar una formalización por normatización de procedimientos. El gobierno local mezcla recursos y

funciones entre ésta y sus otras funciones por lo que dificulta un enfoque optimizador.

3.3 Sistema de Grandes Acueductos

Este proyecto como idea ha tenido varias etapas, comenzó en los 90's con un desarrollo limitado y recién en 2007 pasa a ser una política pública del Gobierno Provincial. En esta instancia, como se señaló, como acción estratégica tiene ciertos déficits de evaluación ex-ante que debieron ser previstos y que ahora resultan es restricciones para su efectividad como política pública. Uno es el de las tarifas y su razonabilidad, la factibilidad de cobro y su transferencia del costo a la tarifa final por parte del prestador, así como la necesidad o no de subsidios cruzados, es decir de cómo financiar zonas o sectores deficitarios por su condición social o ambiental con otros con mayor capacidad de aporte. Otro es que no se evaluó la infraestructura de almacenamiento y distribución con que cuentan los sistemas locales, como cisternas y tanques y su articulación con sistemas de potabilización local. Se observan redes

con una vida útil al límite o sobre pasada, las que se puede afirmar es la fuente de las excesivas pérdidas que evidencian los prestadores en el nivel de agua no contabilizada. Asimismo, es crítico el estado de la micro-medición domiciliaria y de la macro-medición de producción, donde los volúmenes enviados a la red son estimados por el bombeo y la buena cobertura de la medición domiciliaria queda relativizada por el estado/actualización de los aparatos domiciliarios. Tampoco se encontró evidencia de la consideración de aspectos ambientales del proyecto como el impacto del cambio de fuente en los niveles de agua del acuífero, hecho que ha demostrado graves consecuencias en numerosos casos en nuestro país, o de escenarios de emergencia debido a la rotura de las tuberías principales, accidentes en diferentes componentes del sistema (captación, tratamiento, impulsión y conducción) debidas a fallas eléctricas, accidentes o naturales, como el actual estado de estiaje del río Paraná. Como único material registrado se encuentra el Estudio denominado “Evaluación del servicio de abastecimiento de agua potable del Acueducto del Norte Santafesino” (Aquilino y otros, 2019), donde más allá de algunas cuestiones metodológicas observables (el estudio se basa en una encuesta de usuarios casi exclusivamente), se exponen conclusiones similares a las que surgen de esta investigación. El resultado del acueducto Norte tiene componentes esperados como la posibilidad de más cobertura por localidad, mejor calidad química y bioquímica y mayor continuidad en el abastecimiento. Lo que se cuestiona son los costos, un poco quizás por la falta de costumbre a pagar el servicio y quizás la poca conciencia respecto a los costos que implica el contar con ese apreciado recurso. Otros elementos interesantes son algunos cambios en el comportamiento en la población, como la combinación con otras fuentes, el más frecuente lavado de manos y la propensión a las reparaciones internas, se estima a partir de los pagos por consumo debido a la micro-medición domiciliaria. Respecto al prestador, pone de relevancia su desempeño informal, la escasa o nula capacitación técnica y aún administrativa, poniendo énfasis que a ese nivel no hay roles claros sobre la articulación con el acueducto, sobre todo marcando la infraestructura deficiente.

3.4 Muestra de Casos

Con el fin de tener una revisión más detallada del estado del sector en esta franja de la población atendida por pequeños y medianos prestadores, se trabajó con una muestra de 22 cooperativas de toda la Provincia, suministrada por fuentes de la Federación

Nacional de Cooperativas de Agua Potable (FENCAP). Cada una de ellas fue consultada sobre 13 aspectos que permiten caracterizarlas y valorar su desempeño y el estado de cada servicio. Estas dimensiones serán consideradas luego para definir la estructura del modelo de gestión del prestador. A continuación, se presenta un análisis breve de los resultados de cada una de estas dimensiones y luego en la tabla 3 se presenta una síntesis del relevamiento completo:

- i. Cuentas (cantidad de clientes domiciliarios abastecidos): Es amplia la diferencia entre las cuentas (más de 7000 para la ciudad de Carcarañá y menos de 200 para el pueblo de Pujato Norte). Siguen estando todas en una franja que cuestiona su escala en términos de su viabilidad económica. Se debe entonces poner foco en las medidas de optimización para, en todo caso, reducir la necesidad de subsidios u otra acción de fomento económico.
- ii. Servicios (cantidad de servicios que presta la entidad): el 33% presta sólo el servicio de agua, 25% dos servicios y el 42% brinda más de 2. Este tema está relacionado directamente con el anterior ya que la prestación multi-servicio obviamente reparte costos fijos y administrativos, mejora el flujo de caja y naturalmente al aumentar la infraestructura de gestión otorga más posibilidades de sustentabilidad económica, con mayor seguridad y técnica, más allá de que no está garantizada tiene mayores probabilidades en el mismo sentido.
- iii. Fuente (origen del agua cruda que abastece el servicio): el 82% extrae agua subterránea, el 14% agua de río y sólo el 5% ambas fuentes. Esto refleja la localización de los servicios, lejos de cursos de agua con volumen y calidad suficientes y que precisamente éste es uno de los motivadores presuntos de la construcción de los Grandes Acueductos.
- iv. Potabilización (metodología de tratamiento): el 64% sólo agrega cloro al agua, el 14% realiza ósmosis inversa y desinfecta con cloro, el 9% recurre a la decantación y desinfección con cloro y el 14% utiliza filtros biológicos. El hecho del que el 64% de los prestadores sólo desinfecte el agua con cloro, es un indicador indirecto que también interpela fuertemente la necesidad de la

- inversión en la enorme obra de infraestructura mencionada anteriormente.
- v. Micro-medición (% de clientes con medidores domiciliarios): Si bien en términos porcentuales el resultado es bueno (89%) se advierte que es uno de los aspectos más descuidados del servicio debido a: la antigüedad de los equipos de medición (muy superior a la vida útil estimada) y la falta de control.
- vi. Volumen de agua producido (m^3 de agua potabilizados y enviados a la red).
- vii. Volumen de agua facturado (m^3 de agua facturados por período).
- viii. Agua no contabilizada (% entre el volumen de agua que es bombeada a la red y el facturado total de los clientes).
- ix. Tomando todos estos puntos juntos, se debe decir en primer lugar, que el concepto de Agua no Contabilizada no está arraigado como tal en las prestadoras entrevistadas, pudiéndose inferir que tampoco lo está en el resto. Al tocar el tema se habla de “perdidas” en la red, sin relacionar esa incidencia con la suba de costos de producción ni con su impacto en la facturación. Se observa un 39% como promedio de la muestra (con picos de 60% y mínimos de 7%) que se ve como una “fatalidad inexplicable” más que como una oportunidad de mejora tanto en términos técnicos como económicos. Además, los valores expresados de producción de agua se miden en general en forma estimada a partir del supuesto rendimiento de las bombas, siendo muy raros los casos donde se cuenta con macro medición a la salida de la planta, lo que relativiza la medida más exacta que arroja el proceso de lectura domiciliaria y su posterior facturación.
- x. Antigüedad de la red (fecha en que fue construida la red de servicio): Cerca del 80% de las redes existentes en las distintas localidades tiene 30 años o más de instaladas, con varias cercanas a los 50. Esto es un claro posible causante de los valores de pérdidas citados en el punto anterior. Precisamente esta razón, pone el foco en el objeto de inversión en infraestructura que tenga mayor impacto en la mejor prestación del servicio y su sostenibilidad en el tiempo, redes vs acueductos sería la contradicción.
- xi. Tarifa promedio por metro cúbico (valor medio de la tarifa entre las distintas categorías y situaciones de consumo): Este es un aspecto de alta variabilidad también, como se ve se mueve en un rango de U\$S 0.10 a U\$S 0.75 (considerando la cotización oficial del Banco de la Nación Argentina de 70 pesos argentinos por dólar para mayo de 2020) lo que fundamentalmente se puede atribuir, más allá de las posibles diferencias de contexto, tanto a la falta de pautas generales desde los organismos pertinentes como a la ausencia de otras fuentes de asesoramiento técnico, que genera una gran diversidad de métodos de cálculo y muy disímiles políticas de subsidios cruzados internos aplicados en cada cuadro tarifario. En general se observan métodos más intuitivos que basados en pautas técnicas y contables, donde en principio la gran mayoría no considera la amortización de la infraestructura y el equipamiento, así como otros ítems de capital que son considerados gastos, como ser la reposición de micro-medidores fuera de servicio.
- xii. Empleados sustantivos (cantidad de empleados afectados a las tareas directamente relacionada con servicio).
- xiii. Empleados de apoyo (cantidad de empleados afectados a las tareas no directamente relacionadas con el servicio). En estos aspectos, se indagó sobre la cantidad de personal en cada sector del prestador con el fin de poner en evidencia situaciones tales como en la de algunos casos donde la cantidad de empleados administrativos era casi la misma que los operativos de red o planta, lo que obviamente genera costos fijos excesivos, pero felizmente solo se ha encontrado solo un par de situaciones en toda la muestra. Pero también esta información arroja uno de los principales indicadores de eficiencia cual es el de cantidad de empleados por cada mil conexiones, donde se puede observar concluyentemente la razonabilidad entre esta ratio y la cantidad de cuentas a cargo. Es decir, ese indicador es mayor que el promedio situado en 4/1000, por ejemplo, en los casos de menor tamaño del servicio que están en un nivel de 6/1000, esto sería cuando se presentan los posibles casos de des-economías de escala. Si se quiere encontrar la Escala Mínima Eficiente,

de la que se habló en el marco teórico, usando un criterio de benchmarking puede asimilarse en esta muestra al caso donde se observa el mejor valor, que en este estudio está en 1/1000, con un redondeo obvio, por lo menos en cuanto a eficiencia técnica en este aspecto. Precisamente ese valor se observa en las localidades con mayor cantidad de cuentas, por lo que en los otros casos se debería considerar un cierto nivel de ineficiencia inevitable y sobre el que debería pensar alternativas de mejora.

- xiv. Consumo eléctrico (en miles de Kw/mes): En el mismo sentido que el indicador anterior, puede formularse otra medida de eficiencia al analizar cuánta energía es necesaria para que llegue cada m^3 a cada domicilio. Aquí se debe recalcar que en este tema tiene una gran influencia la morfología de la red en función de las condiciones ambientales de cada localidad, pero sí que puede ser asimismo una medida comparativa en casos en que se pueda hacer esto y en un mismo lugar con respecto a períodos anteriores. En los pocos casos en que se pudo relevar la información de ambas dimensiones, consumo y producción, se observan valores entre 0.3 Kw/ m^3 el más eficiente y casi 1 Kw/ m^3 en el peor.

3.5 Aplicación del SADCI

En lo que respecta a la capacidad institucional del prestador, en primer lugar, es necesario puntualizar que el propósito es determinar si se está en el nivel de desempeño necesario alrededor de la seguridad hídrica buscada, o no. Se ha buscado para ello, como se dijo en la metodología, una aplicación adaptada a los sistemas o subsistemas de gestión pertinentes en este estudio de las dimensiones regulares planteadas por la metodología SADCI, así como de las pautas emergentes del modelo de funcionamiento mencionado.

En función de esas dimensiones se han determinado cuali-cuantitativamente el estado de las variables que caracterizan la capacidad institucional existente, justificando los distintos valores utilizados para cada variable en ese proceso. Para la determinación de los déficits de capacidad institucional (DCI), se ha formulado el Objetivo General de Desarrollo institucional (OGDI) en los siguientes términos: contar con los niveles de seguridad hídrica en la provincia que garanticen el cumplimiento de los ODS, en particular el ODS 6 sobre agua potable, a

partir de otorgarle la disponibilidad del servicio a la población a partir de una capacidad institucional acorde, en forma sustentable y equitativa, minimizando los niveles de riesgo en esta dimensión. Seguidamente este OGDI se ha desmembrado en los objetivos por dimensión y en función de éstos se han planteado las actividades para llevarlos a cabo, donde emergen los DCI observados en cada uno de esos aspectos. Cada una de estas instancias se muestra sintéticamente en la tabla 4 donde se formula la estrategia de desarrollo institucional (EDI).

Para plantear la Estrategia de Desarrollo para la satisfacción de los DCI observados, en función de todo lo expuesto y de los emergentes principales del diagnóstico, es conveniente definir primero cual sería el marco conceptual de las acciones para ello. El planteo de la EDI se basa en los siguientes criterios:

- Modelo General de Sustentabilidad. Esto significa lograr una cuenta equilibrada entre ingresos y egresos teniendo en cuenta todos los rubros. Es decir que por un lado deben estar los cobros de tarifas, pero basadas en cálculos de costos y con políticas de cargos cruzados, con más los aportes externos, por subsidios por ejemplo y por el otro deben estar los gastos de operación y mantenimiento, pero que también deben considerarse las amortizaciones de redes y equipos, minimizando los costos indirectos y las pérdidas.
- Organización Necesaria. Buscando minimizar los efectos inevitables de un modelo pre-burocrático indisoluble de la escala de la prestación que se ve en la generalidad de los casos de los prestadores. O sea que debe impedir la improvisación y el desarrollo artesanal de los procesos, así como minimizar los efectos de la familiaridad de los pequeños grupos de trabajo y hacerse fuerte en el cumplimiento de procedimientos estandarizados y metas de eficiencia bien marcadas.
- Integración horizontal y vertical. La mejora de los procesos de compras y contrataciones considerando adquisiciones comunes con otros prestadores, o el requerimiento de servicios profesionales enfocados desde un problema que puede ser común a varias prestaciones, son ejemplos de ello. Mientras tanto en lo vertical se puede pensar en tener más de un servicio, lo que reduce el impacto de los costos fijos y en ampliar la escala de

alcance subsumiendo una prestación cercana físicamente.

- Enfoque sistémico en las relaciones inter-institucionales, con una mirada colaborativa y sinérgica entre los actores, con un marco legal e institucional acorde a los tiempos y a los tipos de prestación existentes y con el usuario del servicio como principal interesado y protagonista en la toma de decisiones.

Para la formulación de las EDI entonces, se tomará específicamente como objeto los prestadores en sí mismos, como se viene haciendo, tanto en lo externo como lo interno, para luego trabajar en escalas más generales. Un Programa de gestión del conocimiento y estandarización de destrezas basado en un modelo de funcionamiento, sería una posibilidad, para luego ir a un nivel mayor abordando el Sistema Global determinado por el sector de agua y saneamiento en la Provincia, donde se enfocará el planteo en los actores de los distintos niveles de Estado y de organización civil.

4. DISCUSIÓN

La certificación es una tendencia mundial entre los prestadores de servicios sanitarios con el fin de otorgar elementos de mejora continua en su desempeño y de esa manera generar confianza tanto en sus usuarios, así como en las entidades de control y financiamiento. Una referencia reconocida la brinda AquaRating (<https://aquarating.org/aquarating/>), sistema basado en un estándar internacional para la evaluación de empresas prestadoras de servicio de agua y saneamiento, concebido en 2008 por el Banco Interamericano de Desarrollo BID y desarrollada mediante una alianza estratégica con la International Water Association (IWA) para contribuir a mejorar la eficiencia y transparencia de los servicios de agua y alcantarillado con el objetivo de que proporcionen un servicio de buena calidad de una manera sostenible. Esta confianza debería reflejarse en general en la solidez institucional del prestador y en particular en su sostenibilidad tanto económico-financiera como técnica. La certificación se basa en la contrastación con parámetros o estándares de calidad del servicio, en base a lo cual se puede dar fe del desempeño óptimo del prestador y/o marcar déficits transformables en oportunidades de mejora. Atendiendo a que en nuestra región no se dan las condiciones de incentivo y/o regulación que induzcan

a los prestadores al esfuerzo por lograr esa meta, quizás resulta mejor por ahora plantear las mismas medidas o acciones de mejora en términos de una visión propia de cada uno de esos déficits. Es así que sería particularmente útil el desarrollo de acciones enfocadas en mejorar los niveles de eficiencia, bajo el enfoque de la gestión de la calidad, considerando el panorama descrito más arriba en cuanto a la actualidad de los prestadores objeto de este estudio.

Bajo este enfoque cada variable de cada tarea debe ser revisada, determinado su nivel con relación a un estándar y que determina una acción para su optimización. Esto en definitiva impondría la eficiencia, en primera instancia técnica y consecuentemente luego económica, como un resultado de un trabajo minucioso en cada etapa del proceso de producción de cada uno de los servicios prestados. Así, como parte de las investigaciones que lleva adelante el Observatorio de Servicios Sanitarios (OSS) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) con sede en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) se ha puesto en evidencia que, dentro de las ineficiencias propias del servicio de agua potable, las pérdidas en torno el concepto de “agua no contabilizada” por el mal funcionamiento de los micromedidores domiciliarios a causa de distintas razones son críticas. Obsolescencia, desgaste y falta de reposición periódica, a lo que se le suman los sectores aún no medidos, generan errores de volúmenes de suministro y, consecuentemente, de facturación. En este sentido, dado un interés de reducir este déficit en cuanto a la optimización del consumo y a la mejor y más justa facturación, el sector de agua y saneamiento de la provincia no cuenta con un Laboratorio Certificador que ponga valores ciertos a esta cuestión y que apoye esta línea de trabajo hacia el futuro. Desde el OSS se han realizado tareas de campo para identificar estadísticamente este problema. Se realiza para ello la evaluación de los medidores in situ con un dispositivo de banco móvil. Esta información generada servirá de base para la instalación de un banco fijo de laboratorio, donde tanto prestadores como fabricantes puedan recurrir a certificar sus aparatos. Otro aspecto fundamental relacionado al manejo del servicio de agua potable (a paso diario) es la falta de macro-medición de la producción tanto del agua cruda de la fuente como de la ya tratada a la salida de la planta. Esto contribuye a los errores de gestión por contar con deficiente información al respecto, hasta inexistente en muchos casos.

Tabla 4. SADCI + EDI: Sistema de Análisis de los Déficits de Capacidad Institucional y Estrategias de Desarrollo Institucional. Fuente: Traba (2019)

Dimensiones	Déficits	EDI
Entorno Político Institucional Dimensión Jurídica	– Marco Jurídico Obsoleto y Parcial	– Nueva Ley de Agua y Saneamiento
	– Ente Regulador con control solo formal y enfocado en ASSA	– Nuevo esquema institucional
	– Acciones parciales por prestador y por Región	– Participación de todos los actores en las decisiones
	– Plan de Grandes Acueductos sin evaluación de Impactos	– Programa de asistencia a pequeños y medianos prestadores
Entorno Económico	– La infraestructura es insuficiente y no cuenta con una política al efecto	– Plan de Grandes Acueductos adaptado a las necesidades y prioridades reales en cada caso y sus impactos
	– Financiamiento parcial y ocasional	– Programa de financiamiento de la renovación y optimización de infraestructura y equipamiento
Entorno Social	– Inexistencia de políticas sobre tarifas	– Programa de estandarización de tarifas adaptadas al caso
	– Entes de consumidores inactivos	– Esquema de participación socio-institucional
Entorno Geográfico	– Actitud delegativa del usuario	– Transparencia en la información pública.
	– Información parcial, fragmentada y opaca	– Políticas de control de fuentes localizadas
Entorno Tecnológico	– No hay gestión de la fuente subterránea	– Programa de fomento y certificación de prestadores
	– El desarrollo tecnológico del prestador depende de las posibilidades de cada caso	– Convenios con Organismos de la ciencia y la tecnología aplicadas al sector
Dimensión Organizacional	– No hay una relación fluida con los organismos técnicos del Estado	
	– Modelo pre-burocrático predominante	– Modelo de aseguramiento de la calidad
Dimensión Operacional	– Personal centrado en competencias operativas autodidactas	– Estandarización de procesos y procedimientos
	– Operación y mantenimiento artesanales	– Manuales de procedimiento
	– Sistemas de información incompletos y/o fraccionados	– Sistemas Integrales de Información (Mod. EcFin + Op y Man + Comercial)
	– Inexistencia de manuales de procedimientos	– Gestión del personal por competencias
	– Medición parcial e inexacta del bombeo de pozos	– Tablero de Comando
	– Potabilización no cuantificada volumétricamente	
	– Control formal de la calidad	
Dimensión Económico Financiera	– Perdidas solo estimadas por balance de volúmenes	
	– Insuficiente micro-medición domiciliaria	
	– Escalas de los servicios en función de realidades locales	– Política de ampliación horizontal y vertical de las prestaciones
	– Tarifas estimadas sin amortizaciones	– Calculo de la tarifa en base a costos de producción integrales
	– Desinversión en infraestructura y equipamiento	– Programa de reinversión con financiamiento externo

Si se pretende igualar en derechos a la ciudadanía en todo el territorio de la Provincia de Santa Fe, por lo menos en materia de acceso al agua potable, hacia el futuro se plantean una serie de desafíos:

- resulta imprescindible que el Gobierno Provincial desarrolle y consensue un nuevo Marco Legal a partir de revisar las Leyes Provinciales 11220 y 12668, incluyendo y definiendo claramente los roles, funciones, responsabilidades de los nuevos y viejos actores, el Prestador Provincial y los Prestadores Locales, contemplar el Sistema General de Acueductos, así como profundizar la Regulación y Control con participación social.
- un reto central es encontrar una manera sustentable para financiar una política sectorial de modernización de la infraestructura y equipamiento como el Sistema General de Acueductos, tanto como en el prestador provincial para plantas de tratamiento y grandes conducciones. Es importante evaluar la necesidad de un nuevo marco legal de la Empresa Santafesina de Grandes Acueductos (SAPEM) y desarrollar un Plan de Gestión con miras al autofinanciamiento operativo, más allá de que si un nuevo plan de Inversiones. Amerita preguntarse si debe seguir adelante con la gestión del Sistema General Acueductos apuntando a constituirse como “mayorista” del sector, o deberá dejar a un tercero un rol central que más allá de garantizar el acceso al recurso por parte de toda la población en las condiciones óptimas que hoy en día no se alcanzan ni se tiene previsto como hacerlo.
- ASSA, la gran empresa prestataria demandante de recursos centrales debería ser realmente autosustentable financieramente y con capacidad para encarar sus propios proyectos relacionados con la micromedición, rehabilitación y ampliación de redes, liberando fondos para los otros prestadores que no cuentan con esa escala de rentabilidad potencial.
- en cuanto a los Gobiernos Locales, ya sea que presten ellos el servicio o lo hagan por medio de alguna otra figura institucional como las Cooperativas, deberán desarrollar los servicios con financiación nacional. Comúnmente esto realiza ante el ENOHS (Ente Nacional de Obras Hídricas y Saneamiento), pero con mayor ejercicio del rol de Autoridad Concedente local.

Asimismo, resulta necesario tener en cuenta la ampliación de redes en la planificación del ordenamiento territorial y desarrollo urbano, mejorando la reglamentación de las edificaciones urbanas y la reglamentación de las instalaciones sanitarias domiciliarias.

- hacia adentro los prestadores, debe revertirse el fuerte déficit de capacidad institucional evidenciado en múltiples aspectos, aunque la baja competencia del personal a cargo del servicio es la principal a atender.
- en cuanto al ente regulador ENRESS, más allá de cuestionar su rol de ser “juez y parte” por lo menos con ASSA, debe afrontar entre sus principales desafíos el de desarrollar la participación de los usuarios y de sus organizaciones, por un lado, así como profundizar y afinar la regulación económica, instaurando a partir de allí incentivos para la efectividad sobre los prestadores como forma de apoyar el recién invocado proceso de desarrollo institucional.

Lograr los objetivos y metas de la Agenda 2030 en relación con la salud y la pobreza, hambre cero, igualdad de género, reducción de las desigualdades, está íntimamente vinculado a garantizar el acceso al agua potable y saneamiento. Esto es más evidente aún en el contexto de esta pandemia, donde todas las recomendaciones de lavado de manos e higiene domiciliaria serán infructuosas o de dudosa efectividad si no se cuenta con agua segura. Claramente los prestadores del servicio de agua potable son los responsables de la “producción del agua potable” que llega a los hogares mediante las redes. Ellos se ocupan de garantizar la protección de las obras de captación -sean estas de aguas superficiales (ríos) como subterráneas (pozos)-, la operación de las plantas de tratamiento y en el caso del control de microorganismos (virus, bacterias) de realizar las dosificaciones de cloro convenientes para la desinfección (en la planta de potabilización, en los tanques, a la salida de cada perforación, etc.). La pregunta es: ¿en el caso de donde no hay red de agua? Es decir, donde se saca el agua de los pozos domiciliarios, ¿quién debe ocuparse? Indudablemente cada vecino tendrá que hacerlo para que la inseguridad hídrica no se acople con la pandemia del COVID-19. El coronavirus que enfrentamos hoy día es poco conocido, recientemente fue detectado en las excretas humanas de las personas infectadas, pero no sabemos cuánto persiste en ellas y en los acuíferos.

En este punto, la convivencia de pozos de agua domiciliarios con pozos negros resulta peligrosa y bien valen todas las medidas para desinfectar el agua que utilizamos para bebida, para lavar frutas, verduras y otros alimentos y para limpiar las superficies de los muebles, picaportes de puertas, llaveros, calzado, pisos, etc.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de esta investigación ha permitido determinar la seguridad hídrica en la Provincia de Santa Fe (Argentina) referida al abastecimiento de agua potable se encuentra en una suerte de estado de equilibrio inestable, fundamentalmente debida a la incierta sustentabilidad de un servicio que presenta los déficits de gestión. Lo planteado está en línea con la hipótesis que motivó la investigación sobre la dependencia que existe entre la seguridad hídrica, la disponibilidad del recurso en cantidad y calidad, la infraestructura y la capacidad institucional del sistema. Deben asegurarse esos factores en forma integral para que cada ciudadano de la provincia cuente en forma segura y accesible con agua potable en la cuantía y condición suficientes en todo momento y con permanencia en el largo plazo. Esto está dicho en función de que, si bien la mayor parte de la población tiene garantizado hoy en día el abastecimiento en un alto porcentaje, la ocurrencia de cualquier fenómeno o suceso adverso pueden poner en evidencia las fallas del sistema actual o en la misma fuente -como la bajante histórica que acontece en estos días en el río Paraná. Existen organismos de gestión que prestan el servicio en forma continua en todo el territorio y los niveles de riesgo son menores en la actualidad, pero su capacidad de reacción a una amenaza no habitual es realmente baja. En términos de pensar una estrategia para revertir los déficits identificados para llevar esta situación a un cuadro realmente sustentable, es importante señalar que las medidas a tomar son de muy diversa índole y de una muy variada gobernabilidad, especialmente para los mismos prestadores. De la misma manera que existen medidas como el cambio de la legislación y la búsqueda de financiamiento, que están en manos de unos pocos actores del sector gubernamental, existen por otro lado, acciones de optimización que dependen más de la voluntad del mismo actor local y de un apoyo cercano que de factores externos.

La nueva legislación es imperiosa a todas luces y debe ser una meta no solo del sector sino de toda la sociedad, pero para su formulación y puesta en vigencia debe pasar las necesarias instancias de

discusión política e institucional y como es de esperar que se convoquen a todos los actores. Esto demandará una cantidad de recursos y de tiempo que dependen necesariamente de los máximos niveles de decisión en la Provincia, pero garantizará un mejor resultado en términos de su integralidad temática y amplia aceptabilidad. La adecuación del Plan de Grandes Acueductos a las realidades locales es otra estrategia multi-actoral necesaria, más allá de sus niveles de avance y de la financiación con que se cuente, debe necesariamente compatibilizarse con la renovación de las redes a nivel local, excediendo ambas medidas largamente el alcance de los prestadores objeto de este estudio y por lo tanto deben ser encarados también por quienes tiene estas responsabilidades en el Estado a nivel Provincial y Nacional. Mientras tanto, no hacen falta muchos recursos para tomar medidas que mejoren rápidamente el nivel de seguridad del servicio. Monitorear y cuidar la fuente, avanzar con manuales de procedimientos de trabajo y generar la necesaria capacitación del personal, incentivar la asistencia técnico profesional, revisar los cuadros tarifarios, entre otras acciones, son medidas que están muy dentro de la capacidad de los prestadores, incluso de los pequeños y medianos. En tanto que sus organismos representativos sepan aunar estas necesidades y generar los acuerdos necesarios con quienes tienen el conocimiento y los recursos tecnológicos para encarar esas acciones. Lo que si se entiende como imprescindible e inmediato es la articulación de los actores con fines de coordinar esfuerzos, compartir información y sumar capacidades con el fin de bien común como es el acceso de la población al agua potable en cantidad y calidad en forma segura. Esta iniciativa debe ser lo más amplia e integrada posible, ergo enmarcada en un proceso de gobernanza efectivo, donde los niveles del Estado, local, provincial y nacional, las Universidades de la Región, el gran prestador ASSA y los prestadores Cooperativos participen en forma directa. Mientras tanto las asociaciones de usuarios se deben una renovación que los ponga en los niveles pertinentes de representatividad que deba ser reconocida por los otros actores y donde efectivamente representen a los usuarios, a partir de cuyos mandatos se constituyen como tales. Todo esto permitirá cumplir en definitiva con el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos en 2030 (ODS 6.1) construyendo esquemas de gobernanza que aseguren la gobernabilidad del abastecimiento de agua en la Provincia.

REFERENCIAS

- Aquilino, N., Gutierrez Bode, M., Laffaire, M., Rubio, J. 2019. "Evaluación del Servicio de Agua Potable del Acueducto del Norte Santafesino" – Plan del Norte, CIPECC, CFI, Gobierno de Santa Fe, 2019. https://www.santafe.gov.ar/noticias/recursos/documentos/2019/06/2019-06-19NID_2657800_1.pdf (consultado en mayo 2020).
- Ávila-García P. , "Vulnerabilidad socio-ambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México", Revista Ciencias, Núm. 90, abril-junio, pp. 46-57 - Universidad Nacional Autónoma de México.
- Elgue, M.; "Más allá de "lo económico" y "lo social". Ed. Corregidor, Bs. As., 2006.
- MIOPyV Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Argentina. 2017. Plan Nacional de Agua y Saneamiento. https://www.argentina.gov.ar/sites/default/files/interior_agua_plan_agua_saneamiento.pdf (consultado mayo 2020)
- Peña, H. 2014. Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe. Serie Recursos Naturales e Infraestructura. CEPAL – GIZ; ONU, N° 178. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40074/1/S1600566_es.pdf. (consultado en mayo de 2020).
- Schein, E. Psicología de la Organización. México: Prentice Hall, 1997. Cap. 4. 3ª Ed.
- Traba L.A. Serra Menghi P., Paoli C. G., Teitelman S., Capello R., Vera M., Fernández R. Y Arregui H. 2017. Prestadores de agua potable y cloacas: Capacidad institucional y desafíos para su sustentabilidad. XXVI Congreso Nacional del Agua, Córdoba, Argentina, 2017.
- Traba, L.A. 2019. Seguridad hídrica y gobernanza en el abastecimiento de agua en la Provincia de Santa Fe (Argentina). Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental, Universidad de La Coruña, España. 108 pp. (inédita).
- Tobelem, A. 1993. Sistema de Análisis y Desarrollo de la Capacidad Institucional (SADCI). Manual de Operaciones. División de Administración del Sector Público, Departamento Técnico Región América Latina y el Caribe. Publicaciones Ocasionales de LATPS N° 9.
- UNESCO. 2012. Seguridad Hídrica: respuesta a los desafíos locales, regionales y mundiales. Programa Hidrológico Internacional. Octava Fase. Plan Estratégico 2014-2021. <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002180/218061s.pdf> (consultado en mayo 2020)
- Vera M. 2019. Análisis de factibilidad de la utilización de humedales construidos como parte del tratamiento de efluentes cloacales de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Informe final Beca de Extensión de UNL-OSS. Santa Fe, Inédito.

Como citar este artículo:

Traba, et al., (2020). Seguridad hídrica y gobernanza en el abastecimiento de agua. Déficit y desarrollo de la capacidad institucional para enfrentar los desafíos sanitarios. caso: provincia de Santa Fe (Argentina). *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 85-99. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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

El proyecto GIRH en la cuenca del río El Naranjo: Síntesis, logros y vigencia a quince años de su formulación

The IWRM project in the El Naranjo river basin: Synthesis, results and relevance fifteen years after its formulation

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental para América Latina y el Caribe

Joram Gil ¹, Marcelo Gaviño Novillo ^{2*}, Víctor Mux Caná ³

Artículo por invitación

ARTÍCULO #200

*Autor de correspondencia

Resumen

Como parte de un proyecto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) en la cuenca del río El Naranjo se brindó apoyo y asesoramiento a autoridades y ciudadanos locales que culminó en la creación de la primera mancomunidad de municipios de Guatemala centrada en la gestión integrada del agua, así como el fortalecimiento a consejos de desarrollo municipales y comunales para la formulación participativa de políticas hídricas. El proyecto fue formulado en el año 2005 y contó con tres componentes: gobernabilidad, fortalecimiento municipal y asociativo e infraestructura, así como dos ejes transversales: uno de género y diversidad y otro de planificación, monitoreo, evaluación y sistematización. Al inicio de las actividades la ocurrencia de la tormenta tropical Stan generó innumerables daños en el país y la cuenca por cual hubo que ampliar el alcance del proyecto brindando asistencia técnica en la emergencia. En el presente trabajo se presenta una síntesis de las actividades desarrolladas, la sistematización de los logros alcanzados, resaltando la vigencia de los postulados iniciales desarrollados como parte de una asistencia técnica internacional que incluyó el desarrollo de un componente de educación ambiental.

Palabras clave: Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, gobernabilidad, fortalecimiento municipal, educación ambiental.

Abstract

An Integrated Water Resources Management (IWRM) project was developed in El Naranjo river basin in which framework support and advice was provided to local authorities and citizens for the creation of the first association of municipalities in Guatemala focused on integrated water resources management, as well as the empowerment of municipal and community councils for the participatory formulation of a water policy. The project began in 2005 and had three components: governance, municipal and associative strengthening and infrastructure, as well as two transversal axes: gender and diversity and other on planning, monitoring, evaluation and systematization. At the beginning of the activities, the occurrence of tropical storm Stan caused innumerable damages in the country and the basin, for which the scope of the project had to be expanded by providing technical assistance in the emergency. This paper presents a synthesis of the activities carried out, the systematization of the achievements, highlighting the validity of the initial postulates developed as part of an international technical assistance that included the development of an environmental education component.

Keywords: Water Resources Management, governance, municipal strengthening, environmental education.

1 *Post mortem.* Director Cátedra UNESCO para la Sostenibilidad de los Recursos Hídricos. Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) Coordinador Eje del Agua, Fundación Solar. joramgil@gmail.com

2 Consultor independiente en planificación y gestión de los recursos hídricos. Coordinador Programa Regional de Ecohidrología UNESCO para América Latina y el Caribe. magavino@gmail.com

3 Cátedra UNESCO para la Sostenibilidad de los Recursos Hídricos, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. agroleonel@yahoo.com.mx

1. INTRODUCCIÓN

Como parte de una iniciativa conjunta entre la Agencia Holandesa para el Desarrollo (NOVIB), por intermedio de la Embajada de los Países Bajos en Guatemala y la Fundación Solar, se desarrolló el proyecto Gestión integrada de los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del río El Naranjo (GIRH) con objeto de impulsar un ciclo de gestión en tres municipios del Departamento de Quetzaltenango (San Martín Sacatepéquez, San Juan Ostuncalco y Palestina de los Altos) y cinco municipios del Departamento de San Marcos (San Antonio Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos, San Cristóbal Cucho y Esquipulas Palo Gordo), en tanto un ejercicio de fortalecimiento institucional de los gobiernos municipales y empoderamiento social de las asociaciones comunitarias para la gestión del agua. Fue organizado según tres componentes: gobernabilidad, fortalecimiento municipal y asociativo, e infraestructura; contando con dos componentes transversales: uno de género y diversidad cultural y otro de planificación, monitoreo, evaluación y sistematización. El proyecto se desarrolló entre los años 2005-2008, período durante el cual buena parte del país fue afectado por la tormenta tropical Stan que generó severos impactos al país y a la cuenca en particular (octubre de 2005). Las metas centrales del proyecto fueron la sensibilización de la comunidad, el fortalecimiento de la organización municipal y la capacitación de la población para que conozca sus derechos de acceso al agua, participe de la preservación de los recursos hídricos y adquiera responsabilidad social en la prestación de los servicios básicos. Para ello se promovió y contó con la participación de la organización **Comunidades Asociadas por el agua, medio ambiente, Desarrollo Integral e Infraestructura Sostenible de la cuenca del río el Naranjo (CADISNA)**; así como de la **Mancomunidad de municipios de la cuenca del río el Naranjo (MANCUERNA)** integrada por los ocho gobiernos municipales de la Parte Alta con vigencia y alta incidencia a nivel local, regional y nacional actividad quince años después de su conformación.

A fin de contribuir con una visión de largo plazo sobre la gestión del agua desde una perspectiva integrada se decidió reforzar a los equipos técnicos locales de la Fundación Solar con la participación de expertos internacionales, quienes contribuyeron en la ejecución del proyecto, fortaleciendo el componente de educación ambiental. En el presente trabajo se

presenta una síntesis de las actividades desarrolladas, la sistematización de los logros alcanzados y la vigencia de los postulados de su formulación quince años después, que incluyó el diseño de un componente de educación ambiental con perspectiva de género y multi-culturalidad considerando el entorno multicultural de la población de la cuenca.

1.1 La cuenca del río El Naranjo

Se extiende sobre la vertiente del Océano Pacífico entre los meridianos 91°36'56" y 92°12'23" y los paralelos 14°29'49" y 15°01'17" en los departamentos de San Marcos (27% de la superficie) y Quetzaltenango (73% de la superficie) (figura 1). Las nacientes de la cuenca tienen lugar en la Sierra Madre, siendo el Cerro Chile (3,560 m) el punto de mayor elevación, acompañado de otras cumbres de importancia como el volcán de la Laguna Chicabal (2,900 m) y los cerros Tuicacaix (3,322 m), Los Veinte Palos (3,082 m), Siete Tambores (2,572 m), Saquibutz (2,514 m) y Tumincantzé (2,792 m) todos localizados al este de la cuenca. La elevación media es de 1,270 m, contando con una pendiente media de 21 % (Fundación Solar, 2005). La cuenca presenta una forma irregular (figura 1), abarcando una superficie aproximada de 1,273 km² con un eje fluvial principal que se extiende por 105 km hasta desembocar en el Océano Pacífico (INSIVUMEH, 1982). Limita al Norte con la Cuenca del Río Cuilco, al Este con las subcuencas de los ríos Samalá y Ocosito, al Sur con el Océano Pacífico y al Oeste con la cuenca del Río Suchiate, límite internacional con México. Se subdivide en tres regiones o provincias geomorfológicas que presentan distintas condiciones climáticas, topográficas y fisiográficas. La Parte Alta (montano bajo), corresponde a una altiplanicie ubicada en el cinturón volcánico de Guatemala, comprendiendo suelos montañosos caracterizados por fuertes pendientes, topografía escarpada a ondulada con valles y planicies y elevaciones que se extienden entre los 1,600 m a más de 3,000 m. La Parte Media (piedemonte volcánico, subtropico húmedo) se caracteriza por presentar una zona menos escarpada, con topografía ondulada y elevaciones que se extienden entre los 900 m y los 1,600 m. Finalmente, la Parte Baja (planicie costera del Pacífico, trópico seco y húmedo) constituida principalmente por suelos aluvionales, ligeramente plana, con declive natural hacia el Océano Pacífico y elevaciones que se extienden entre el nivel del mar y los 900 m. en la llanura costera.

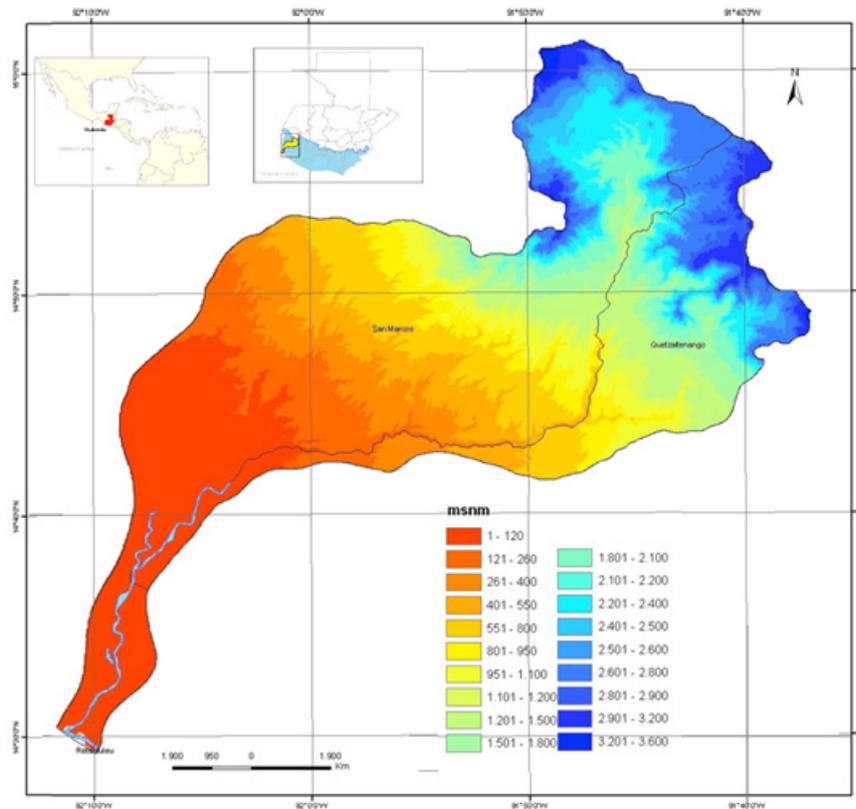


Figura 1. Cuenca del río Naranjo: delimitación, límite departamental y modelo digital del terreno
Fuente: Gaviño Novillo et al, 2007

La precipitación media anual en la cuenca fluctúa entre 1,000-3,000 mm en la Parte Alta; entre 2,000–5,000 mm en la Parte Media y entre 1,500–2000 mm en la Parte Baja, con un promedio anual de 3,240 mm (Orozco, 2007). El río Naranjo presenta en la estación hidrométrica Corral Grande, en la Parte Alta, un caudal medio anual de 2.3 m³/s; en Coatepeque, en la Parte Media, 20.4 m³/s; mientras que en la confluencia con el río Meléndrez, en la Parte Baja el caudal medio anual es de 23.7 m³/s. La cuenca está sujeta a una intensa dinámica hídrica a la que se suma el volcanismo y la ocurrencia de tormentas tropicales que constituyen amenazas naturales de gran relevancia. El transporte de sedimentos es del orden de los 1,087 ton/año/km², parte del cual se deposita en la llanura costera afectando la capacidad de transporte de los caudales del río Naranjo (Orozco, 2007).

1.2 Perfil socioeconómico

Comprende 19 municipios en los Departamentos de Quetzaltenango (5) y San Marcos (14) con una población total al momento del proyecto de 343,205

personas y tasas de natalidad de 2.9% en Quetzaltenango y 3.5 % en San Marcos, por lo cual la población se espera que se duplique estimativamente en 29 años, siendo un importante forzante para la gestión del agua en la cuenca. La Parte Alta específicamente comprende ocho municipios con sus habitantes distribuidos en 192 centros poblados entre ellos pueblos, aldeas, caseríos y fincas, contando con San Pedro Sacatepéquez (51,044 personas), San Marcos (25,428 personas) y San Juan Ostuncalco (22,633 personas) como los principales centros urbanos. La Parte Media incluye seis municipios con habitantes distribuidos en 383 centros poblados entre los que se incluyen asentamientos y centros urbanos como El Tumbador (33,732 personas), Nuevo Progreso (26,140 personas) y Colomba (23,248 personas). La Parte Baja comprende total o parcialmente cinco municipios siendo Ayutla (19,205 personas), Pajapita (16,600 personas) y Catarina (14,736 personas) los centros urbanos con mayor concentración poblacional. Las cabeceras municipales en este sector cuentan con servicios de cobertura parcial de abastecimiento de agua potable

y alcantarillado cloacal. Una de las características más relevantes de la Parte Alta de la cuenca es la población indígena, predominantemente de las comunidades mayas K'iche' y Mam, que se concentran en los municipios de San Martín Sacatepéquez, San Juan Ostuncalco, Palestina de los Altos, y San Pedro Sacatepéquez, con elevados índices de analfabetismo (6%). Tanto en la Parte Media como en la Baja la población indígena es mucho menor (tabla 1).

La población económicamente activa es del 29.84% con una proporción promedio de dependencia de cuatro personas, siendo la contribución masculina del 77% con una preponderancia en la actividad agrícola,

mientras que el trabajo de la mujer significa solamente el 23% de la PEA razón por la cual el tema del género es relevante. Los otros sectores de la economía tienen importancia en los estratos urbanos centrales, tales como manufactura y servicios personales, mientras que la mujer forma parte de la economía informal. Los indicadores de pobreza y pobreza extrema son muy altos de acuerdo al mapa de la pobreza por municipios en Guatemala (tabla 2).

Las características de la población fueron expresamente consideradas con particular atención en el proceso de implementación del proyecto de manera de considerar un perfil multicultural con enfoque de género desarrollado por la Fundación Solar.

Tabla 1. Perfil demográfico de la población en la cuenca

Cuenca	Total	%	Urbana	Rural	Indígena	No indígena	Alfabeta	No alfabeta
Alta	150,735	44	65,312	85,423	49,600	101,135	39,662	47,129
Media	125,196	36	33,875	91,321	11,674	113,523	31,063	36,394
Baja	67,274	20	22,156	45,118	2,063	65,210	24,207	22,352
Total	343,205	100	121,342	221,863	63,337	279,868	94,932	105,875

Fuente: Fundación Solar, 2005

Tabla 2. Indicadores de pobreza en los municipios de la cuenca

Parte de la cuenca	Municipio	% de pobreza	% de pobreza extrema
Alta	San Juan Ostuncalco	87%	47%
	San Martín Sacatepéquez	77%	23%
	Palestina de los Altos	82%	31%
	San Antonio Sacatepéquez	85%	40%
	San Pedro Sacatepéquez	56%	16%
	San Marcos	69%	47%
	Esquipulas Palo Gordo	93%	57%
	San Cristóbal Cucho	82%	32%
Media	El Quetzal	92%	62%
	La Reforma	84%	41%
	Nuevo Progreso	84%	38%
	El Tumbador	83%	39%
	El Rodeo	90%	61%
	Colomba Costa Cuca	81%	38%
Baja	Ocós	80%	33%
	Ayutla (Tecún Umán)	65%	25%
	Catarina	74%	30%
	Pajapita	74%	41%
	Coatepeque	53%	12%

Fuente: Mapa de pobreza de Guatemala por municipio (2001)

1.3 El impacto de la tormenta tropical Stan

La tormenta tropical Stan azotó Guatemala en la primera semana de octubre de 2005, generó daños y pérdidas por 983 millones de dólares, equivalente al 3.4% del PIB de 2004 (CEPAL, 2005), valor posteriormente ratificado por el propio gobierno de Guatemala como porcentaje equivalente del PIB de 3.68 % (MINFIN, 2013). Si bien su trayectoria abarcó la península de Yucatán y se dirigió posteriormente hacia el sudoeste, afectó buena parte de Centroamérica, y en particular a Guatemala (CEPAL, 2005; Pasch *et al*, 2006; CONRED, 2010) (figura 2).

La intensas lluvias ocasionadas por la tormenta afectaron alrededor de un tercio del territorio de Guatemala (15 de los 22 departamentos del país, 133 municipios afectados y 1158 comunidades) e incrementaron el caudal de pequeños y grandes ríos y quebradas ocasionando deslizamientos y gran acarreo de material, desbordamientos e inundación en las planicies costeras con graves consecuencias (670 muertos, 850 desaparecidos y 3.5 millones de damnificados) (CEPAL, 2005; CONRED, 2010). La

precipitación acumulada entre el 1 y el 10 de octubre fue muy elevada con valores crecientes desde el sur de la meseta central del país hacia la costa sur del Pacífico con isólinas mayores a los 350 milímetros y valores puntuales de 362.5 mm para San Marcos y del 279.2 en Quetzaltenando (INSIVUMEH, 2006) (figura 3).

Los severos impactos se dieron en el sector social (vivienda, salud, educación, condiciones de vida, empleo), sector económico (agricultura, ganadería, pesca, industria, comercio, turismo), infraestructura (sistemas de agua potable y saneamiento, sector eléctrico, transporte y comunicaciones) y el ambiente (figura 4).

Como resultado de la deforestación y la consecuente desprotección de los suelos en la Parte Alta se provocaron deslizamientos de tierra y corrientes de lodo que afectaron comunidades enteras, personas, viviendas, edificios públicos, sistemas de abastecimiento de agua, redes de tendido eléctrico, vías de comunicación, zonas cultivadas con granos básicos y hortalizas para consumo interno y de exportación y producción pecuaria (figura 4).

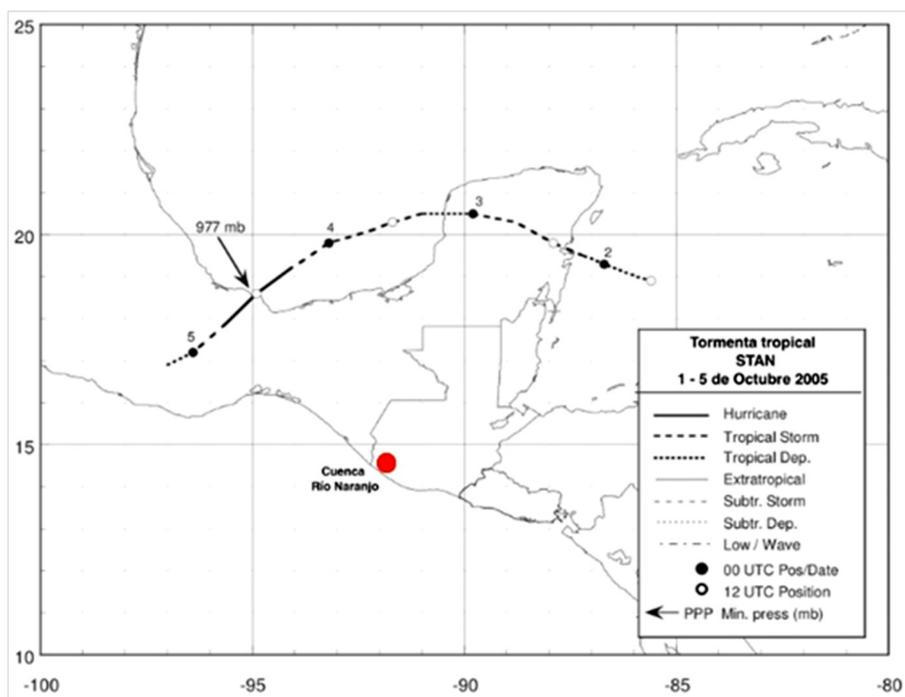


Figura 2. Trayectoria de la tormenta tropical Stan los días 1 a 5 de octubre de 2005
Fuente: Adaptado de centro de huracanes, 2006

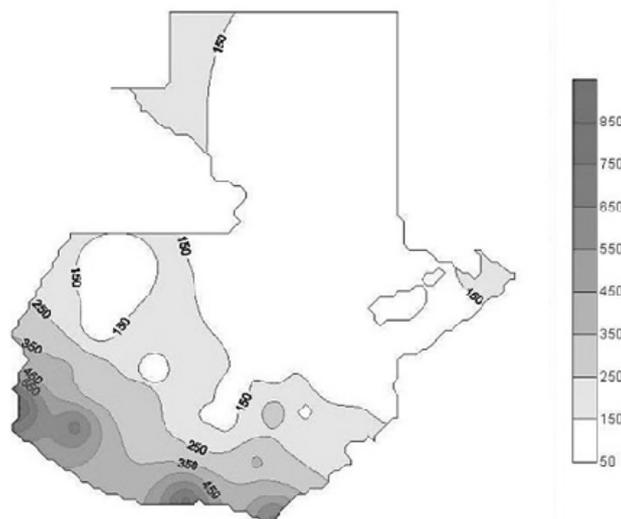


Figura 3. Mapa de isótopos de lluvia acumulada del 1 al 10 de octubre de 2005
Fuente: Adaptado de INSIVUMEH, 2005



Afectación infraestructura



Deslizamientos de laderas



Destrucción de viviendas e infraestructura urbana



Cauce del río Naranjo en crecida

Figura 4. Registros fotográficos durante la tormenta Stan en la cuenca del río Naranjo
Fuente: Gil, J., 2005

Los afluentes del río El Naranjo se desbordaron dando lugar a inundaciones en la Parte Media y Baja de la cuenca. En la cuenca un total de 154,235 personas fueron afectadas directamente al resultar total o parcialmente destruidas las viviendas o bienes, mientras que 45,000 personas estimativamente fueron afectadas indirectamente, encontrándose alojadas en refugios temporales (albergues y casas de parientes).

El número de los damnificados fue incierto pues hubo personas desaparecidas enterradas en el barro. Los daños materiales fueron cuantificados inicialmente por el equipo de trabajo del proyecto conjuntamente con las autoridades locales y nacionales, sin poder evaluar las consecuencias emocionales y psicológicas que generó la catástrofe.

Posteriores evaluaciones, superada la emergencia, estimaron las pérdidas solamente al sector agrícola, pecuario y forestal en 30 millones de quetzales y una pérdida de sus fuentes de ingreso para el siguiente semestre por parte del 75% de la población (MANCUERNA, 2005).

1.4 Alcances de la asistencia técnica al proyecto

La asistencia técnica internacional al proyecto tuvo como objetivo general: a) fortalecer y crear capacidades locales para la gestión integrada del recurso hídrico, propiciando los espacios para la participación ciudadana, la capacitación en aspectos técnicos, organizacionales y socio-económicos, a fin de que los actores locales y la sociedad civil organizada pueda determinar sus prioridades y emprender la autogestión local del recurso hídrico.

b) sensibilizar y capacitar a los actores clave del programa en diferentes espacios de incidencia en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (sector privado, municipalidades, grupos indígenas, cooperativas agrícolas, sector campesino, etc).

c) sistematizar las lecciones aprendidas alrededor de la gobernabilidad del recurso hídrico en la Parte Alta de la cuenca del río El Naranjo a fin de que sirva de material de capacitación para el manejo de conflictos y propuestas de solución, permitiendo su replicabilidad en otras cuencas y regiones, así como definir participativamente los lineamientos, la estructura, alcances y contenidos del Plan Estratégico para la cuenca.

Las actividades se extendieron a fin de desarrollar un programa de educación ambiental ad-hoc.

2. METODOLOGÍA

2.1 Proceso seguido

Objetivos del proyecto. A partir del año 2000, con los ocho municipios que integran la parte alta de la cuenca del río El Naranjo se inició el proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en la Cuenca Alta del río El Naranjo (GIRH) cuyo objetivo general fue “contribuir al fortalecimiento del estado de derecho, como condición fundamental para la paz social, mediante acciones de investigación legal aplicada, facilitación de organización y participación informada y ordenada del público y de las autoridades locales y nacionales, en derredor de la gestión integrada de los recursos hídricos“. Sus principales metas fueron: a) la población de la Parte Alta está organizada para hacer valer sus derechos de acceso al agua y por tanto asumen sus responsabilidades en su gestión integrada; b) las municipalidades de la Mancomunidad han aumentado la cobertura y el acceso de los servicios de agua y saneamiento garantizando los derechos de la población en relación a la gestión integrada de los recursos hídricos, y c) las municipalidades de la Mancomunidad y las asociaciones de la sociedad han institucionalizado la capacidad de administrar los servicios de agua y saneamiento con un enfoque integral de equidad e inclusión social, garantizando la sostenibilidad financiera y ambiental que fomenta el estado de derecho, y por ende la gobernabilidad de los recursos hídricos. La meta final fue la promoción de un estudio de caso de GIRH en Guatemala como paradigma para administrar los usos y la conservación del agua a escala local para satisfacer las necesidades presentes y futuras de la población de la Parte Alta de la cuenca del río El Naranjo (Fundación Solar, 2005).

El proceso metodológico de GIRH. La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) debe entenderse como un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado de los recursos de agua y tierra con el propósito de maximizar el beneficio económico y el bienestar social en un marco de equidad, sin comprometer las sostenibilidad de los ecosistemas vitales (GWP, 2000; Gaviño Novillo, 2001). Involucra necesariamente un cambio de mentalidad y actitud mediante el cual las soluciones a los problemas deben surgir de procesos en los que cada actor participa de una manera diferente, pero integrando visiones con el resto en un contexto en el que los diferentes usos del agua son

interdependientes. Para su implementación se requiere un fortalecimiento de la gobernabilidad a partir de un ejercicio democrático, basado en la transparencia y el diálogo sincero para el logro de acuerdos y consensos para el pleno ejercicio de los derechos y cumplimiento de las obligaciones. Contrasta con el modelo sectorial que asigna el recurso y lleva delante el monitoreo del uso en un contexto de objetivos sociales, económicos y ambientales. La implementación práctica de un proceso de GIRH se inicia a partir de un consenso sobre los principios asumidos por la sociedad a escala local en relación con el agua, en total sintonía con los diversos marcos internacionales vigentes, a partir de los cuales es posible establecer políticas hídricas en tanto declaraciones expresas acerca de las intenciones que tienen los gobiernos locales y la sociedad organizada para la gestión del agua (figura 5).

En el contexto del ciclo de la GIRH los instrumentos son los elementos que permiten su implementación

en la práctica, orientando el proceso de toma de decisiones y acciones. Entre los instrumentos básicos necesarios para la implementación de los principios y las políticas se encuentra un Plan de Gestión. Su elaboración implica definir los escenarios de planificación; los objetivos estratégicos y operativos; las estrategias y un programa operativo. Dichos instrumentos requieren una gerenciamiento apoyado sobre un conjunto de acciones destinadas a materializar y/o promover las actividades de coordinación, compatibilización, articulación e implementación de los instrumentos (Planes, programas, proyectos) a regular el uso, control y protección de los recursos hídricos para finalmente implementar un control mediante instancias en las cuales se evalúa la conformidad del proceso con los principios de partida, para luego dar lugar a un nuevo ciclo en un proceso sistémico de mejora continua (Gaviño Novillo, 2001).



Figura 5. Ciclo sistémico de la gestión integrada de los recursos hídricos
Fuente: Gaviño Novillo, 2001

2.2 Los actores del proceso GIRH

Tomando en consideración la secuencia de un ciclo de GIRH, es clave la identificación de los actores, entre los que participan autoridades, ciudadanos e instituciones. En el presente estudio de caso del lado de la sociedad se contó con Comunidades Asociadas por el Agua, Medio Ambiente, Desarrollo Integral e Infraestructura de la cuenca del río Naranjo (CADISNA), conformada entre los años 2001 y 2005. Desde la esfera gubernamental con la Mancomunidad de municipios de la parte alta de la Cuenca del río Naranjo (MANCUERNA) que nació como una asociación de ocho municipios con mandato para ejecutar acciones encaminadas a

promover el uso, aprovechamiento y conservación del recurso hídrico en forma integral en la cuenca del río El Naranjo, en beneficio de sus habitantes; con la participación activa y coordinada de los gobiernos locales, las instituciones nacionales involucradas, sector privado, sociedad civil organizada y población en general, basándose en principios de equidad social, eficiencia económica y sostenibilidad ambiental. La MANCUERNA cuenta con personalidad jurídica mediante acuerdos celebrados entre los concejos municipales de los ocho municipios de la Parte Alta para la formulación común de políticas públicas municipales, planes, programas y proyectos, la ejecución de obras y la prestación de servicios.

La Ley de Consejos de Desarrollo Urbano y Rural del año 2002 favorece en Guatemala la organización comunitaria por medio de los Consejos Comunitarios de Desarrollo (COCODES) y Consejos Municipales de Desarrollo (COMUDES) por intermedio de los cuales se habilita la participación de la población organizada en la formulación, definición y ejecución de la política hídrica en cada comunidad y en la toma de decisiones a nivel de municipio. Debido a cierta demora en su implementación, algunas asociaciones comunitarias se integraron en CADISNA como espacio de diálogo para el planteamiento de propuestas de desarrollo local con énfasis en el agua.

A partir de procesos de sensibilización y capacitación dirigidos por instituciones como la Fundación Solar, en coordinación con las municipalidades, se logró integrar en cada municipio asociaciones que posteriormente vieron la necesidad de constituirse legalmente en una red con lineamientos propios hasta convertirse en lo que fue CADISNA. Los actores involucrados en el ciclo GIRH fueron múltiples, con intereses y necesidades diferenciadas, sin embargo todos confluyeron en la necesidad de una gestión integrada a los fines de la obtención de los logros del proyecto (figura 6).

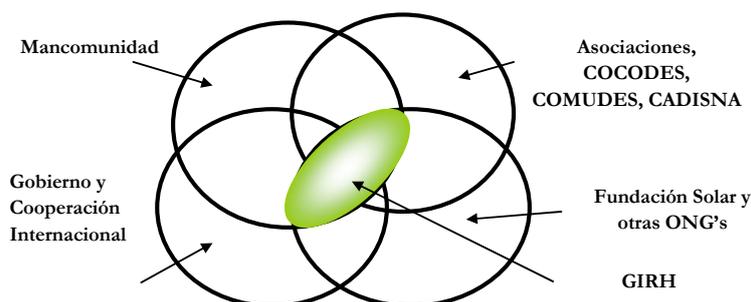


Figura 6. Actores estratégicos del proyecto GIRH
Fuente: Fundación Solar, 2006

Debido que en Guatemala no existe una Ley de Aguas, los integrantes de CADISNA incidieron de abajo hacia arriba desde su creación en la formulación de políticas hídricas municipales en espacios de diálogo enfocando derechos y obligaciones en algunos municipios de la MANCUERNA. Las Políticas Hídricas Municipales se constituyeron en documentos de consenso en torno de la valoración del recurso y su gestión, reconocida por las autoridades municipales, quienes participan en su implementación. Los ciudadanos y autoridades se han involucrado en su diseño, asignación de recursos e implementación, con la asesoría de instituciones especializadas (GWP, 2013).

2.3 La dimensión de género y multiculturalidad del proyecto

Las instancias de diagnóstico llevadas a cabo en el marco del proyecto mostraron que las mujeres en las áreas rurales de la Parte Alta de la cuenca predominantemente están dedicadas a la actividad hogareña, ocupando un 25% de su tiempo diario en el acarreo de agua y otro 25% al acarreo de leña (Fundación Solar, 2006). Son verdaderas protagonistas en la gestión de los recursos hídricos y

por tanto participantes igualitarias en la implementación de los proyectos, donde una perspectiva de género y métodos participativos incrementan la equidad y la eficacia de los mismos. La inclusión de un eje transversal de género tuvo como objetivo valorar las implicaciones para las mujeres y para los hombres sobre cualquier acción que se lleve a cabo con el proyecto. Esta ha sido una estrategia para conseguir que las preocupaciones y experiencias de las mujeres, al igual que las de los hombres, sean parte integrante de la elaboración, puesta en marcha, control y evaluación de la GIRH en la cuenca del río El Naranjo de manera que las mujeres y los hombres puedan beneficiarse de ellos igualmente sin perpetuar la desigualdad. O sea, no solamente estuvo centrado en la participación de las mujeres en los espacios públicos, sino también en la reducción de las desigualdades existentes en las relaciones sociales a través de acciones que toman en cuenta la situación de desventaja en la que se encuentran las mujeres en la cuenca. La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) con un enfoque de género reconoce la diversidad y la multiculturalidad de los usuarios y usuarias del agua en un contexto social, ambiental, económico y

cultural, pero también reconoce el acceso diferencial y generalmente desigual en las instancias u organizaciones de toma de decisión referentes al agua en todos los niveles. El involucramiento de las mujeres y los hombres permitió fortalecer la eficacia y la eficiencia del proyecto, siendo una salvaguardia de su sostenibilidad. Sin duda los logros del proyecto tuvieron mayores probabilidades de alcanzar los objetivos como resultado de la intervención activa de mujeres en la toma de decisiones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Los principales conflictos en la cuenca

Diagnósticos asociativos. Como parte del componente de Fortalecimiento Municipal del proyecto GIRH se desarrollaron diagnósticos participativos llevados a cabo por las asociaciones de usuarios del agua con objeto de ofrecer una visión de la situación en cada uno de los ocho municipios de la Parte Alta de la cuenca. Resumen los resultados de las entrevistas estructuradas mantenidas con los integrantes de las Juntas Directivas y asociados de los distintos grupos conformados, complementados con información secundaria validada por los miembros. Cada asociación fue notificada de la metodología a ser utilizada a fin de clarificar a los asociados el ámbito legal, organizacional, administrativo, dinámica de funcionamiento de las reuniones, identificando necesidades de fortalecimiento, y capacitación. Los informes fueron sistematizados como instrumentos de revisión y seguimiento tanto para las Juntas Directivas de las Asociaciones, asociados en general, instituciones cooperantes y organismos gubernamentales como parte del proceso de gestión del proyecto. Como resultado de la integración de la información, se resumen los principales conflictos percibidos en la cuenca (Gaviño Novillo, 2006):

- i. Riesgos naturales o inducidos: terremotos, deslizamientos de laderas, huracanes y tormentas tropicales, inundaciones, erosión de los suelos por deforestación, ascenso del nivel freático, salinización de los suelos.
- ii. Condicionantes climáticas: si bien el balance hídrico de la cuenca es positivo, las deficiencias en el aprovechamiento del agua debido a alternancias climáticas a lo largo del año, con meses de déficit hídrico y otros de exceso, afectan la seguridad alimentaria por escasez de agua para el riego.
- iii. Calidad del agua: contaminación doméstica con aguas servidas; contaminación por efluentes de la agroindustria del café; contaminación por vertido de agroquímicos provenientes del cultivo de hortalizas, café, maíz; contaminación por vertido de residuos sólidos en los cauces.
- iv. Accesibilidad al agua: nacientes de los cursos de agua concentrados en terrenos de propiedad particular que obliga a la compra-venta privada del acceso al agua.
- v. Déficit de infraestructura: la carencia de infraestructura de captación, almacenamiento, tratamiento y distribución impiden el acceso al agua de manera universal a fin de cubrir las demandas y prever los requerimientos futuros. Se cuenta con limitadas capacidades para el tratamiento de aguas servidas.
- vi. Infraestructura clandestina: construcción de quineles, desvío de cauces naturales de ríos, conexiones sin autorización, sabotaje a sistemas de agua.
- vii. Condicionantes económicas: niveles de pobreza y de pobreza extrema muy elevados en la cuenca, sobre todo entre la población indígena.
- viii. Participación: las limitaciones educativas y económicas de parte de la población condicionan su participación en la resolución de problemas relacionados con el manejo del agua, sea por desconocimiento del ejercicio de derecho de petición o del procedimiento, orientación adecuada o falta de recursos para pagar asistencia técnica legal que suele ser sinérgica con la falta de voluntad política de las autoridades.
- ix. Solidaridad: prevalencia de actitudes individualistas, dificultad en compartir recursos (i.e.: aldeas de Serchil e Ixcamal en el municipio de San Marcos).
- x. Armonía social: tensión social y económica creciente por el acceso al agua con alto nivel de conflictividad.
- xi. Liderazgo social: carencia de liderazgos locales en relación a la administración de los recursos hídricos, prevalencia de atención de la población urbana en desmedro de la población rural.
- xii. Coordinación: los Consejos de Desarrollo Urbano y Rural que tienen a su cargo promover el desarrollo priorizan acciones de manera

aislada, sin una planificación hídrica o política de gestión integrada del agua.

xiii. **Capacidad institucional:** carencia de un ejercicio pleno de la autoridad municipal o departamental para abordar de manera planificada la gestión del agua o la resolución de conflictos con sectores poderosos que privilegian intereses sectoriales. A pesar de la vigencia del Sistema de Consejos de Desarrollo Urbano y Rural hay

algunos municipios que no contaban con capacidad para integrar los Consejos Comunitarios o Municipales de Desarrollo, limitando la participación de la población organizada en la formulación, definición y ejecución de la política hídrica de su respectiva comunidad y toma de decisiones a nivel de municipio.

Tabla 3. Síntesis de daños de la tormenta Stan relevados al 11/X/2006

No.	Departamento	Municipio	Muertos	Daños a los sistemas de agua y saneamiento	Viviendas destruidas o dañadas	Personas en albergues temporales	Observaciones
1		San Martín Sacatepéquez		3 sistemas de agua potable y drenajes dañados	300		2 puentes colapsados
2	Quetzaltenango	San Juan Ostuncalco		5 Sistemas de abastecimiento de agua destruidos parcialmente	10 viviendas destruidas 30 viviendas afectadas	1,200	Dstrucción total de cultivos de maíz y papa.
3		Palestina de los Altos		Sin afectación			
4		San Cristóbal Cucho	12	11 km del sistema de agua potable y de drenaje destruido		114	Sistema de telefonía y energía eléctrica afectado
5		Esquipulas, Palo Gordo		Sin datos	5 viviendas destruidas 36 viviendas con daños		Perdida de cultivos, maíz, frijol, aves de corral, etc.
6		San Marcos	3	Los drenajes están afectados en un 10 %.	47 destruidas 150 dañadas	1.582	Dstrucción de central hidroeléctrica Funciona con DEOCSA.
7	San Marcos	San Pedro Sacatepéquez	47	Sistema de abastecimiento de agua colapsado. Contaminación grave Desaparecidos Daños sistemas de alcantarillado	500 destruidas 1,580 dañadas	5,872	Deslaves fuertes en Piedra Grande y San Andrés Chapil, causando el número más alto de personas fallecidas en el Municipio. Comunidades totalmente incomunicadas con una cantidad muy alta de deslaves y derrumbes.
8		San Antonio Sacatepéquez	2	Se requiere una reparación de 16 proyectos de agua potable que quedaron destruidos. Se requiere una reparación de 22 proyectos de mini riego que quedaron destruidos.	134 destruidas 108 a punto de colapsar		12 puentes fueron totalmente destruidos. Sistema de telefonía afectado

La suma de conflictos en la cuenca del río El Naranjo muestra una debilidad organizacional para una gestión del agua a escala local que se traduce en un alto grado de vulnerabilidad de sus habitantes, especialmente en la Parte Alta circunstancia que diera lugar a la formulación del proyecto de Gestión integrada de los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del río El Naranjo (GIRH) desarrollado con la participación de la población de manera organizada y en forma coordinada para que puedan asumirse los desafíos señalados.

Evaluación de daños por tormenta Stan. Con base en los datos sistematizados por parte del equipo técnico de la Fundación Solar con la asistencia de expertos internacionales se resumieron los impactos directos ocasionados en los municipios de la Parte Alta de la cuenca por la tormenta Stan en los medios de vida de las familias vulnerables, generando información básica para todas las intervenciones posteriores del proyecto.

El impacto fue notable sobre las familias campesinas que cultivan en pequeñas parcelas en las zonas de ladera, con insuficientes insumos agrícolas, estimándose que las familias más pobres perdieron en parte o totalmente sus activos de capital físico y su producción (75%). Como parte de la asistencia brindada por el proyecto se sistematizaron los daños generados (tabla 3).

Entre las medidas de mitigación que fueron identificadas en el marco del proyecto con diversos actores nacionales e internacionales (FAO, PNUD, UNESCO) durante la Feria del Agua para la cuenca se pueden indicar:

- Programa de huertos familiares en traspatio, cosecha de agua y módulos de animales.
- Mejoramiento y protección de suelos.
- Forestaría comunitaria.
- Producción de hortalizas en condiciones controladas (invernaderos).
- Rehabilitación de caminos rurales y sistemas de riego y agua entubada dañados mediante programas de alientos por trabajo o pago por trabajo.
- Programas de capacitación en oficios y actividades no agrícolas.
- Programas de protección y mejoramiento del patrimonio pecuario familiar (traspatio).
- Programa de semillas artesanales mejoradas (materiales locales adaptados).
- Fortalecimiento de la organización local y comunitaria.

3.2 Avances en desarrollo de infraestructura

La singularidad del componente de infraestructura surge de la organización de un proceso participativo de identificación de las inversiones prioritarias en agua, saneamiento y riego (usos productivos), mediante el análisis y clasificación de las demanda. La MANCUERNA y las asociaciones fueron los responsables de la priorización de los proyectos a fin de dar inicio y seguimiento a los estudios de pre-inversión y posteriormente de la ejecución de las obras. Éstas se orientaron a aumentar la cobertura y el acceso a los servicios de agua y saneamiento a través de obras de infraestructura y facilitar el ejercicio de los derechos y obligaciones de los ciudadanos. Las acciones que de común acuerdo se planificaron y ejecutaron con las siguientes (figura 7).

- Cosecha de agua de lluvia (CALL): se proyectaron y construyeron 100 sistemas de recolección con bombeo manual beneficiando a 413 familias.
- Acueductos y saneamiento rural (ASR): centrado en el abastecimiento de agua potable intra-domiciliar rural por gravedad, sumideros y letrinas incluyendo 10 sistemas comunitarios de agua potable, 1000 sumideros y 1000 letrinas. La construcción se previó y ejecutó durante los tres años del proyecto.
- Plantas de agua residuales (PTAR) y plantas de residuos sólidos (PRS): se previeron ocho plantas de agua residual y dos de residuos sólidos.
- Proyectos productivos (PP): Se beneficiaron 255 familias con aporte de materiales y mano de obra calificada para la construcción de proyectos productivos de micro-riego con agua de cosecha de lluvia.

En consonancia con los proyectos de infraestructura se desarrolló un programa de reforestación de 1,478 hectáreas, incluidas especies de valor comercial (energía bosques, huertos) para la recarga hídrica y/o para reducción de vulnerabilidad a eventos climáticos, así como la organización de la mano de obra no calificada. Las medidas no estructurales se han centrado en la institucionalización de la capacidad de administrar los servicios de agua y saneamiento con las municipalidades de la MANCUERNA, con un enfoque integral de equidad e inclusión social, garantizando la sostenibilidad financiera y ambiental que fomenta el estado de derecho y por ende la gobernabilidad de los recursos hídricos. Para ello se planificaron y ejecutaron talleres de capacitación en áreas técnicas (i.e.: fontanería), administración, asistencia legal y

conservación ambiental con la Mancomunidad y los operadores de los servicios de agua y saneamiento, así también se implementó un sistema de auditoría social que permita verificar la administración de los servicios conforme a las necesidades priorizadas.

3.3. Componente de educación ambiental

Componente de educación ambiental: Guía GIRH. Como una estrategia central en la sensibilización y la capacitación de líderes, lideresas, representantes de la sociedad civil, pobladores de la cuenca, sector privado, municipalidades, grupos mayas,

cooperativas agrícolas, sector campesino y otros actores clave en un ciclo de GIRH, se elaboró material educativo de manera participativa a fin de apoyar cursos, talleres y reuniones con la comunidad, contando con un insumo elaborado bajo los principios de equidad e inclusión social, eficiencia económica y sostenibilidad ambiental, con énfasis en género y multi-culturalidad, y así facilitar la internalización de las responsabilidades que le compete a cada uno en la gestión de los recursos hídricos.



Construcción de zanjas para conducciones con mano de obra de los usuarios



Cisternas de almacenamiento de agua comunitarias



Cisternas de almacenamiento de proyectos de cosecha de lluvia en la Parte Alta



Sistema de captación del agua y tanque de almacenamiento

Figura 7. Testimonios fotográficos de parte de la infraestructura construida en la cuenca
Fuente: Fundación Solar, 2005

El material elaborado como parte de la asistencia técnica internacional incluyó un Paquete Educativo compuesto por dos láminas y una guía metodológica. Esta última incluye una descripción sintética acerca cómo abordar la enseñanza-aprendizaje de los adultos; la descripción de metodologías de enseñanza

especialmente seleccionadas para llevar adelante el proceso de sensibilización y capacitación en la Parte Alta de cuenca del río Naranjo; una descripción del rol de los capacitadores y las capacitadoras; y una explicación acerca de la función de las dos láminas que lo componen (figuras 8 y 9).

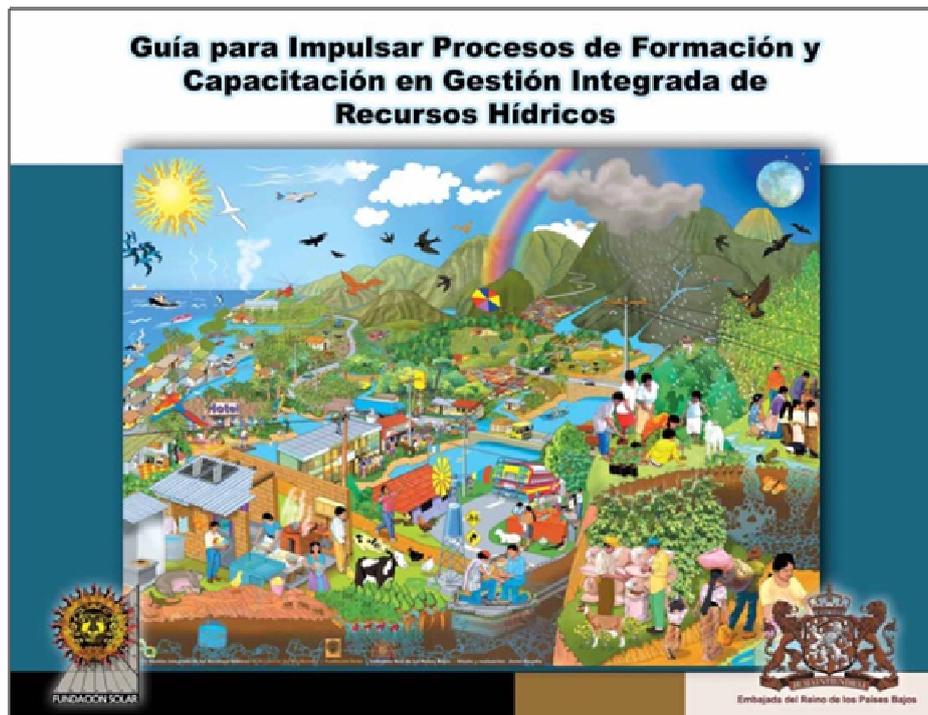


Figura 8. Carátula de la Guía del Proyecto GIRH
Fuente: Gaviño Novillo, Romero, Azurdía, Gil, Mux, 2006; Fundación Solar, 2006b



Lámina 1. Conflictos en la cuenca del río El Naranjo



Lámina 2. Visión de la cuenca resultante de la GIRH

Figura 9. Láminas del paquete educativo
Fuente: Gaviño Novillo, Romero, Azurdía, Gil, Mux, 2006.

El Paquete Educativo cuenta con dos láminas que presentan a simple vista una escena idéntica que incluye una multiplicidad de temas como: el ciclo del agua; definición de una cuenca, aguas superficiales y subterráneas; GIRH; higiene y salud; género y multiculturalidad; saneamiento; producción agrícola, ganadera e industrial; servicios (turismo); riesgos (contaminación, inundaciones, deslizamiento de laderas, deslaves; y sostenibilidad técnica, ambiental y económica, dentro del ambiente físico, socio-cultural, económico y político de la cuenca del río El Naranjo (figura 9). Pero es posible identificar que cada una de las láminas representan dos situaciones claramente distintas: la Lámina 1 representa la realidad de la cuenca resultante de la identificación de conflictos al inicio del proyecto en base a los diagnósticos asociativos, mientras que la Lámina 2 muestra una situación esperable como resultado de la implementación de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos imaginada a un futuro a 15 años y para las generaciones futuras.

Su finalidad es generar una instancia de análisis, debate y diálogo que permitiera a los participantes de un evento de formación de capacidades expresar sus ideas, sus conocimientos, sus realidades, sus experiencias, sus necesidades, sus sueños, sus deseos, así como apoyar acuerdos y desacuerdos entre las dos situaciones presentadas.

Feria del agua. En el marco del componente del proyecto GIRH: Fortalecer la participación de la

población, se organizó y preparó la Primer Feria del Agua en el Departamento de San Marcos con el objetivo de difundir las actividades del proyecto y desarrollar actividades de capacitación con la población en general así como con las niñas, niños y adolescentes sobre la importancia de la organización comunitaria para una gestión del agua. Los objetivos de la Feria fueron:

- Informar sobre avances y limitaciones en la GIRH.
- Popularizar el concepto de GIRH para tener la participación activa de la población.
- Vincular estratégicamente acciones interinstitucionales en apoyo a la GIRH.

Entre las actividades desarrolladas cabe mencionar: foros y eventos culturales, conferencias, exposiciones, curso de GIRH, giras por la cuenca para constatación de los efectos de la tormenta Stan, concursos escolares, publicidad, programas radiales y de televisión, conferencias de prensa, foros con universidades, políticos, instituciones, ONGs. Se desarrollaron diversas dinámicas vivenciales a partir de las experiencias del Programa Agua y Educación de la UNESCO (Gaviño Novillo, Romero, 2004) y se compartieron experiencias y opciones para la gestión de la cuenca del río El Naranjo mediante un dialogo con los expositores y expertas del proyecto (figura 10).



Inauguración de la Feria del Agua en la Sede de la Municipalidad de San Marcos



Elaboración de bombas artesanales con asesoría de Joram Gil a participantes de la Feria del Agua



Actividades de empoderamiento de las mujeres mayas de la cuenca en la gestión del agua



Trabajando con los niños y niñas en el Paquete Educativo de Agua y Educación de UNESCO

Figura 10. Registros fotográficos de la Feria del Agua
Fuente: Gaviño Novillo, 2006; Fundación Solar, 2005

3.4 Logros del proyecto entre 2005 y 2008

Logros institucionales. Por intermedio del proyecto GIRH se estimuló el interés para una mayor participación de la sociedad en la toma de decisiones sobre el agua y se contribuyó para la constitución de la primera mancomunidad de Guatemala cuyo objetivo específico es la GIRH (MANCUERNA), que luego de 15 años del inicio del primer ciclo del proyecto (2005-08) sigue activa, vigente y con incidencia a nivel local, regional y nacional a la fecha de elaboración del presente trabajo como un ejemplo poco frecuente de sustentabilidad organizacional (<http://www.mancuern.org>). Con las diversas actividades llevadas a cabo se logró un acercamiento entre la sociedad civil (por medio de las asociaciones legalizadas) y las municipalidades para llevar acciones conjunta sobre los recursos hídricos en las cuales también se toman en cuenta las necesidades de agua por parte de las mujeres en un contexto multicultural.

Durante la vigencia del proyecto la mancomunidad y grupos organizados de la Parte Alta de la cuenca han desarrollado en un período de tres años un diálogo intersectorial local que les ha permitido demandar sus derechos de acceso universal al recurso agua y operativizar de forma organizada la gestión integrada del recurso hídrico, contando con políticas y acuerdos municipales con repercusión en la región. Han posicionado a la cuenca como la unidad de planificación eco-regional y de convergencia de intereses municipales y de las comunidades.

Los líderes y lideresas de los grupos de base, así como de las municipalidades que conforman la mancomunidad coinciden en que el concepto inicial y central para la GIRH lo constituye el derecho de acceso universal al recurso agua, destacando que “el agua más cara, es la que no se tiene”. El acceso a los servicios de agua se planea bajo los principios de equidad e inclusión social, eficiencia económica y sostenibilidad ambiental, siendo estos los principales factores que ahora se consideran en la formulación de los planes, programas y proyectos que demanda la mancomunidad. Complementariamente se pudo verificar un sistema legal débil que llega inclusive a un vacío de autoridad el cual es percibido por la sociedad de manera muy negativa por lo cual se ha detectado una demanda de sensibilización y empoderamiento de la sociedad civil en relación a los derechos de acceso universal al recurso hídrico, inclusive con un profundo interés en participar en la administración del recurso hídrico y los servicios públicos relacionados con el agua.

Ha sido por ello uno de los principales logros del proyecto la creación y fortalecimiento de capacidades locales para la GIRH por medio de la participación ciudadana, a partir de la cooperación y la capacitación en aspectos técnicos, organizacionales y socioeconómicos para que los actores locales y la sociedad civil organizada pueda determinar sus prioridades y emprender la autogestión local del recurso hídrico, a fin de ejercer los derechos y obligaciones de los ciudadanos que tendrán en el

futuro la gestión del agua en sus manos, así como la decisión sobre la inversión en proyectos que proporcionen el acceso universal al recurso hídrico como un derecho humano.

Logros específicos. Se apoyó la organización de ocho asociaciones en la gestión de los recursos hídricos que fueron la base de la constitución en Comunidades Asociadas para el Desarrollo Integral Sostenible del Naranjo (CADISNA), así como la mancomunidad (MANCUERNA), compuesta por funcionarios y empleados de los municipios que firmaron la Declaración de Miralvalle estableciendo el sistema de Diálogo de Mesas de Agua Municipales para brindar un foro de diálogo sobre GIRH. Otros logros incluyen: i) participación directa del sector del agua con las autoridades nacionales, locales y la población organizada, ii) diagnósticos asociativos de los municipios, iii) generación de un sistema de información geográfica para la cuenca, iv) estudio hidrológico, v) creación de capacidades, vi) participación y promoción a nivel local, municipal y niveles regionales.

Los beneficiados y beneficiadas con el proyecto son aproximadamente un total de 199,898 habitantes de los cuales 114,805 son directos y 85,093 indirectos. Los primeros están ubicados en la Parte Alta de la cuenca y los indirectos en la Parte Media. Estos últimos se consideran indirectos debido a que no habrá una intervención directa en su comunidad; sin embargo, todas las acciones de saneamiento ambiental y de reforestación que se realicen en la Parte Alta repercuten positivamente en dichas comunidades. Del total de beneficiados y beneficiadas el 51% son mujeres y 49% son hombres, el 46% pertenecen al grupo indígena maya mam y el 54% se consideran ladinos. Del 100% de beneficiados el 98% se ubica en el área rural y un 2% en el área urbana, sobre todo en lo que se relaciona a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

En relación a la situación de emergencia, tal como fuera presentado en la Feria del Agua por CONRED, se han instalado Sistemas de Alerta Temprana con el apoyo del Departamento SAT de la SE-CONRED en coordinación con las alcaldías y las Coordinadoras Locales para la Reducción de Desastres COLRED por medio de la instalación de instrumental hidrometeorológico automático y radios de telecomunicación en siete puntos, parte de los cuales cubren la cuenca con objeto de reducir las vulnerabilidades y los riesgos desde la perspectiva de la gestión integrada. Los beneficiarios son la

población más vulnerable de San Marcos, particularmente la que vive dentro de la cuenca El Naranjo y habita en zonas rurales alejadas, vulnerables y muy susceptibles a desastres por sismos, deslizamientos e inundaciones. Se estima que el sistema beneficia a un total de 553,039 personas, de las cuales 319,630 habitan en la cuenca del río El Naranjo. Parte de estos aspectos fueron incluidos en el Paquete Educativo considerando que representa la visión de los pobladores sobre la cuenca en la que viven.

4. CONCLUSIONES

La Fundación Solar con el apoyo de la Agencia Holandesa para el Desarrollo (NOVIB) dio inicio a un impulso en la implementación de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Guatemala como parte del proyecto en la Parte Alta de la cuenca del río El Naranjo en ocho municipios implementado en el año 2005. El proyecto se centró en consolidar una gobernabilidad alrededor de los recursos hídricos incluyendo el acceso al agua y la institucionalización de la capacidad de administrar los servicios de agua y saneamiento con un enfoque integral de equidad e inclusión social. Como resultado del mismo la GIRH fue y sigue siendo parte de la agenda de las autoridades locales que integran la Mancomunidad de Municipalidades de la Cuenca del Río El Naranjo; se lograron ejecutar acciones relacionadas con la gestión del agua incluyendo su aprovechamiento, protección y conservación.

La población y las autoridades locales, municipales y departamentales de la cuenca del río El Naranjo han internalizado los principios de la gestión del agua, del ciclo hidrológico y del GIRH, aunque todavía ello se exprese en acciones aisladas. No obstante lo cual es posible constatar la intención de las autoridades municipales, departamentales y de la población en la necesidad de incrementar la cobertura del agua, recuperar su calidad y seguir promoviendo la capacitación. La población y las autoridades internalizan el valor del agua desde la perspectiva social, económica y ambiental, aunque razones culturales mantienen la concepción mítica o religiosa que el agua es un don de Dios y no logran aceptar que el agua potable es un producto tecnológico que requiere cantidad, calidad y continuidad por lo cual su tratamiento tiene un costo.

Luego del ciclo del proyecto desarrollado entre 2005 y 2008 el proyecto ha logrado cierto grado de sustentabilidad dado que la Mancomunidad sigue vigente y se ha visto fortalecida. Los consejos comunales y de desarrollo municipal en conjunto con las alianzas comunitarias desarrollaron las Políticas Municipales de Agua que es implementada por las autoridades municipales. Ello se ha visto favorecido por diversas acciones como la firma del Memorando de Entendimiento para la Cooperación Técnica para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos GIRH entre la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), la Cátedra UNESCO del Agua y la Fundación Solar que dio lugar a múltiples actividades vigentes a la fecha y entre ellas la replicación del proceso GIRH en las cuencas estratégicas Xayá y Pixcayá en el año 2009.

A los cinco años de finalizado el primer ciclo del proyecto, en 2013, el sistema de Diálogo de Mesas de Agua Municipales evolucionó hasta institucionalizarse como un Comité Mandatorio conocido como Comisión de Desarrollo Económico, Turismo, Medio Ambiente y Recursos Naturales en cada municipio en el marco de los COMUDES y COCODES. Ello mantiene la vigencia en la práctica de varias iniciativas resultado del proyecto GIRH: sensibilización y capacitación en GIRH, formulación de políticas municipales de agua, establecimiento del

Diálogo de Mesas de Agua Municipales, generación y gestión de información sobre recursos hídricos, participación social como garante de la sostenibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado con el Apoyo de la Agencia Holandesa para el Desarrollo (NOVIB) por intermedio de la Embajada de los Países Bajos en Guatemala y la Fundación Solar en el marco del contrato de Marcelo Gaviño Novillo (Argentina) destinado a apoyar el proceso de implementación de un ciclo de gestión integrada de los recursos hídricos en la Parte Alta de la cuenca del río El Naranjo bajo la coordinación de Joram Gil, Director de la Cátedra UNESCO para la Sostenibilidad de los Recursos Hídricos de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad San Carlos de Guatemala con el apoyo de Víctor Mux. Un especial reconocimiento a Gabriela Romero (Argentina), del Programa Agua y Educación de la UNESCO, quien estuvo a cargo del componente de educación ambiental y el diseño de la guía de gestión integrada de recursos hídricos. Finalmente, un agradecimiento a Iván Azurdia, Gloria Aragón, Elisa Colom y la experta en género Leontine van den Hooven de la Fundación Solar (Guatemala).

REFERENCIAS

- Aragón, G (2006) Governance report of the components under project Integrated Management of Water Resources in the top of the Naranjo River Basin, Fundación Solar. Inédito.
- CEPAL (2005) Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan. Misión de emergencia. Octubre. 121pp.
- CONRED (2010) Evaluación de daños y pérdidas sectoriales y estimación de necesidades ocasionados por desastres naturales en Guatemala entre mayo septiembre de 2010, Preparado por el Gobierno de Guatemala con el apoyo de la Comunidad Internacional. Equipo Nacional de Coordinación a cargo de la Secretaría de Planificación y Coordinadora Nacional para la Programación de la Presidencia Reducción de Desastres, Guatemala. https://www.gfdr.org/sites/default/files/Evaluacion_de_danos_y_perdidas_AGATHA_Y_PACAYA_oct_8_2010_reduced.pdf
- Fundación Solar (2005) Estado del agua en la cuenca del río el Naranjo. Eje del agua. Proyecto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en la parte alta de la Cuenca del río Naranjo, NOVIB, Inédito. 48pp.
- Fundación Solar (2006) Informe narrativo del proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en la Cuenca Alta del Río El Naranjo, Período 1 de Octubre 2005 a 30 de Junio 2006, Proyecto 12644/GUA/0058303, Guatemala, Inédito, 55 pp.
- Fundación Solar (2006b) Guía para impulsar procesos de formación y capacitación en gestión integrada de los recursos hídricos. Material educativo resultante de la asistencia internacional para el Proyecto GIRH de Gaviño Novillo.

- García Bickford & Asociados Consultores (2009) Informe final de evaluación final de proyecto. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos GIRH en la parte alta de la Cuenca del Río el Naranjo 2005 – 2008. Inédito.
- Gaviño Novillo, M (2006) Informe final de consultoría. Proyecto GIRH. Fortalecimiento de las capacidades en materia de gestión integrada de recursos hídricos, sensibilización y capacitación de líderes, y sistematización de la información del proyecto. Proyecto gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca alta del río Naranjo en los Departamentos de San Marcos y Quetzaltenango. 3 Tomos.
- Gaviño Novillo, M. (2001) La gestión ambiental y la gestión integrada de los recursos hídricos. Apuntes del Curso Internacional de Posgrado Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad de Buenos Aires-Instituto Argentino de los Recursos Hídricos.
- Gaviño Novillo, M. Romero, G, Azurdia, J, Gil, J, Mux, V (2006) Láminas del Paquete Educativo
- Gaviño Novillo, M. Romero, G. (2004) Agua y educación. Paquete educativo y láminas. Manual de educación ambiental para niños de 3 a 12 años. Programa Hidrológico Intergubernamental. UNESCO, Montevideo (Spanish and English version).
- Gaviño Novillo, M.; (2009) Integrated Water Resources Management. Technical final report. X International Postgraduate Course, Argentine Institute of Water Resources and University of Buenos Aires. Arg-CapNet.
- Gaviño Novillo, M.; Guerrero Borges, V. (2007) Sistema de Información de la Cuenca del río Naranjo. Organización de la geodatabase. Proyecto gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca alta del río Naranjo en los Departamentos de San Marcos y Quetzaltenango
- Gil J (2011) Strategy for the construction of the organizational framework for the water management in the upper part of the Naranjo River Basin.
- Gil, J (2011) Speaking so that people understand: integrated water resources management in Guatemala, UNESCO, Cultural Organization Chair in Sustainable Water Resources, Guatemala
- GWP (2000) Manejo integrado de recursos hídricos, TAC Background Papers N 4, Estocolmo, 76pp.
- GWP (2013) Asociatividad para incidencia en GIRH en la cuenca del río Naranjo. Guatemala. https://www.gwp.org/es/learn/KNOWLEDGE_RESOURCES/CASOS/Americas-y-el-Caribe/Guatemala-C-A---Asociatividad-para-incidencia-en-GIRH-en-la-cuenca-del-rio-Naranjo-327/
- INSIVUMEH (1982) Estudio Hidrológico Básico de la Cuenca del Río Naranjo. Inédito. Guatemala.
- INSIVUMEH (2004) Atlas hidrológico. Guatemala, Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología,
- MANCUERNA (2005). Informe de Situación y Plan de Acción ante el Desastre Provocado por la Tormenta Tropical STAN. Informe en progreso al 25 de octubre de 2005. Departamentos de San Marcos y Quetzaltenango. Guatemala. Inédito. 38 pp.
- MINFIN (2013) Hacia una mejor calidad del gast. Revisión del gasto público en Guatemala. Reducción de la pobreza y gestión económica. Unidad de gestión para América Central. Oficina Regional de América Latina y el Caribe. Banco mundial
- Morataya, M., Pérez, O (2007) Action plans for the municipalities of the Upper Naranjo River Bason, NUFFIC, 150pp.
- Mux, V. (2006) Narrative Report for the Embassy of the Kingdom of the Netherlands in the framework of the project 'Integrated Water Resources Management'.
- Mux, V. (2018) Gobernabilidad económica en agua y saneamiento en el contexto de los pueblos indígenas del occidente de Guatemala, Presentación Power Point, Cátedra UNESCO para la Sostenibilidad de los Recursos Hídricos, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería
- Mux, V., Tovar, R., Orozco, J. (2007) Building from the grassroots the guiding framework and management models for water and sanitation, Tikalia, FAUSAC

- Orozco, E (2007) Estudio hidrológico de la parte alta de la cuenca del río Naranjo. Departamentos de San Marcos y Quetzaltenango, Fundación Solar.
- Pasch, R.; Roberts, D. (2006) Report Tropical Cyclone Hurricane Stan:1-5 October 2005. National Hurricane Center.
- Tax, P. (2013) Inventario y caracterización de los Sistemas de Alerta Temprana de Guatemala. Fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana en América Central. Proyecto Regional DIPECHO VII, UNESCO-CEPREDENAC.

Como citar este artículo:

Gil, J., Gaviño, M., Mux Caná, V. (2020). El proyecto GIRH en la cuenca del río El Naranjo: Síntesis, logros y vigencia a quince años de su formulación. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 100-119. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Aqua-LAC

Revista del Programa Hidrológico Intergubernamental
para América Latina y el Caribe

Estrategias de gestión para el abastecimiento sostenible de agua segura a pequeñas comunidades del noroeste de la provincia de Santa Fe (Argentina)

Management strategies for sustainable safe water supply to small northwest communities of the province of Santa Fe (Argentina)

Luciano Sánchez¹, Mario Basán Nickisch², Marta Paris^{*3}

Recibido: 22/06/2020

Aceptado: 26/09/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

Las pequeñas localidades del noroeste de la Provincia de Santa Fe son conocedoras de los problemas de escasez de agua en cantidad, calidad y oportunidad. Un régimen de precipitaciones irregular, distancias largas a cursos de agua superficial, aguas subterráneas con elevada salinidad y/o altos contenidos de arsénico, plantean limitantes para el abastecimiento humano, rural e industrial. Diversas soluciones se aproximan para garantizar el consumo de agua segura. Sin embargo, la falta de involucramiento de los usuarios y destinatarios de los proyectos de agua y/o saneamiento desde el inicio de la gestión, limitaciones o carencias de conocimiento, asimetrías de información, inexistencia o no aplicación de mecanismos de participación y ausencia de compromiso institucional local, entre otros, suelen conducir al fracaso de las tecnologías que se diseñan para suplir los requerimientos sanitarios por la no apropiación o adopción social de las mismas. En este trabajo se presentan algunos lineamientos de gestión para contribuir al abastecimiento de agua segura a pequeñas comunidades del noroeste santafesino basados en los Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia (SCALL). Se ha implementado una metodología de trabajo que considera todas las variables y todos los actores intervinientes en la temática desde el diagnóstico hasta la puesta en práctica de las acciones estructurales y las medidas no estructurales correspondientes. Se seleccionó como caso demostrativo del plan de gestión integrado del abastecimiento de agua segura al Paraje Santa Lucía (Departamento Vera, Municipio de Vera, Provincia de Santa Fe).

Palabras clave: Gestión integrada de los recursos hídricos, agua segura para el consumo humano, sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia.

Abstract

The small towns in the northwest of the Province of Santa Fe are aware of the problems of water scarcity in quantity, quality and opportunity. An irregular rainfall regime, long distances to surface water courses, groundwater with high salinity and / or high arsenic contents, pose limitations for human, rural and industrial supplies. Different solutions are approaching to ensure safe water consumption. However, the lack of involvement of users and recipients of water and / or sanitation projects from the beginning of the management, limitations or lack of knowledge, information asymmetries, non-existence or non-application of participation mechanisms and lack of commitment Local institutions, among others, often lead to the failure of technologies that are designed to meet health requirements due to their lack of appropriation or social adoption. In this work, some management guidelines are presented to contribute to the provision of safe water to small communities in northwestern Santa Fe based on the rain harvesting systems (SCALL, according with its Spanish acronym). The implemented methodology has been taken into account all the variables and all the actors involved in the subject from diagnosis to the implementation of the structural actions and the corresponding non-structural measures. As a pilot case to show the integrated management plan for the safe water supply was selected the Santa Lucia Area (Department Vera, Municipality of Vera, Province of Santa Fe).

Keywords: integrated water resources management, safe water for human consumption, rain harvesting systems.

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina. sanchez.luciano@inta.gob.ar

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina. basannickisch.mario@inta.gob.ar

3 Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Argentina. parismarta@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento del recurso hídrico es un tema de interés mundial ya que al tratarse de un elemento vital es imprescindible contar con él. Por ello, es que siempre existió en el hombre la necesidad de poder manejarlo de manera de que le permita llevar adelante sus actividades. En este sentido, según el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016 “Agua y Empleo” (WWAP, 2016), más del 75% de los puestos de trabajo a nivel mundial dependen de dicho recurso. Es así que, a través de una adecuada gestión del agua, las infraestructuras y el acceso a un suministro seguro junto con los servicios de saneamiento adecuados mejoran no solo el nivel de vida sino que también permiten la expansión de las economías locales y regionales creándose puestos de trabajo más dignos, los que repercuten a su vez, en una mayor inclusión social.

Si se tiene en cuenta los 37 acuíferos más grandes del mundo, se estima que 21 de ellos están siendo gravemente sobreexplotados, lo que trae como consecuencia no solo su agotamiento sino también su deterioro en lo que respecta a la calidad de sus aguas, incrementando de esta forma la escasez económica de la misma ya que en ocasiones los tratamientos suelen tener costos prohibitivos. También se dimensiona que cerca del 10% de la población mundial carece de acceso a una fuente de abastecimiento donde se mantienen separadas el agua para uso humano de las destinadas a los animales y de la contaminación fecal. En tanto que si además se tiene en cuenta la calidad, es decir, un agua que resulte segura para el consumo humano y que no enferme a las personas que la beban, ese porcentaje se incrementa a más del 25% (OMS; UNICEF, 2015).

Como suele suceder en muchos casos, el recurso agua no se encuentra de forma indiscriminada y sin ningún tipo de restricción. Es así que, existen zonas donde las fuentes de agua son de buena calidad y proveen un gran caudal y otras, donde sucede lo contrario como por ejemplo las áridas y/o semiáridas que presentan serias limitaciones de disponibilidad en términos de cantidad y calidad.

Otras zonas vulnerables en lo que hace al abastecimiento de agua, independientemente del ambiente natural donde se encuentren, son las rurales. En ellas muchas veces, además de correr con el inconveniente de poder encontrarse en las regiones mencionadas, pueden hallarse aisladas, contar con

una distribución dispersa de sus viviendas, un bajo nivel socio económico por parte de sus pobladores, un limitado acceso a nuevas tecnologías o escaso financiamiento económico para acceder a las mismas o una deficiente infraestructura existente, supervisión, control y apoyo por parte del Estado, lo que hacen que dicha problemática se vea incrementada. Es así que, a la propia dificultad de acceder a fuentes de abastecimiento (ríos, lagos, acuíferos) se suma la complejidad referida a estos factores socio-económicos y políticos locales. Sumado a ello, en los establecimientos y comunidades rurales, persiste el desconocimiento sobre criterios básicos para el manejo integral del recurso hídrico, en donde perdura la idea de sacarse rápidamente el agua del predio, en vez de contenerla para evitar impactos aguas abajo o almacenarla para aprovecharla en periodos de sequía.

La problemática hídrica del área de estudio se centra básicamente en dos aspectos: (i) la irregularidad de las precipitaciones. Entendiéndose por tal a lo que hace a su duración, intensidad y espacialidad, lo que da lugar tanto a escenarios de anegamientos como de sequías. (ii) La calidad y cantidad del agua subterránea. La presencia de altas concentración de sales y arsénico la tornan no apta para el consumo humano y en algunos casos hasta para la producción como puede ser el abrevado de animales o el riego de huertas y/o cultivos. En tanto que, las bajas permeabilidades de los estratos geológicos de ciertas zonas acentúan aún más la problemática, dado el acotado rendimiento de los reservorios acuíferos.

Es así que los inconvenientes que afrontan los pobladores en lo que respecta al abastecimiento de agua para consumo humano, radican básicamente en la falta de calidad, cantidad y disponibilidad del agua a lo largo del año.

Para realizar esta investigación se ha escogido una pequeña localidad rural denominada Santa Lucía, que se considera que, desde el punto de vista sociocultural y económico, es representativa de numerosos parajes rurales existentes no solo en el norte santafesino sino en el resto de las provincias que componen la Argentina. Dicho Paraje, geográficamente se encuentra situado en el Departamento Vera, al norte de la provincia de Santa Fe, a unos 300 km de la capital provincial (Santa Fe), y a 35 km al noroeste de la ciudad de Vera (cabecera del departamento homónimo), de la cual depende administrativamente (figura 1).



Figura 1. Ubicación geográfica del Paraje de Santa Lucía

El abastecimiento de agua potable de los habitantes del Paraje de Santa Lucía se realiza a partir del acceso a la fuente subterránea por medio de una perforación de aproximadamente 20 m de profundidad, donde el nivel estático se encuentra a unos 5 m bajo boca de pozo. Dicho recurso subterráneo no es adecuado para el consumo humano por presentar elevadas concentraciones de residuo seco, sodio, potasio y cloruros. Por esta razón, el agua debe ser tratada mediante ósmosis inversa. Sin embargo, la capacidad de producción de dicha planta de tratamiento no alcanza a satisfacer la demanda, sobre todo en los meses de verano cuando el consumo es mayor. Además, los reiterados cortes de energía eléctrica, que suelen suceder en este tipo de ambientes rurales, dificultan su normal funcionamiento, que junto a la falta de mantenimiento en el recambio de membranas y filtros hacen que la misma trabaje de forma deficiente.

Debido a estos problemas es que el municipio de la ciudad de Vera, a través de un camión cisterna, provee agua potable a los habitantes, dejándoles el suministro en cada hogar en tambores, bidones, baldes o recipientes capaces de almacenarla. Esta alternativa de abastecimiento también presenta sus inconvenientes, dado que no puede ser llevada a cabo

en días de lluvia e incluso posteriores a estos debido a que para acceder al Paraje se debe transitar unos 15 km de camino de calzada natural (tierra). A esto, debe agregarse la incertidumbre que implica, por un lado, el estado mecánico de dicho camión y por el otro, el hecho de que también el mismo debe abastecer a otros parajes de la zona, lo cual incrementa aún más dicha incertidumbre generando un cierto malestar en la población.

En este sentido, es que la ocurrencia de las precipitaciones en la zona al contabilizar valores considerables toma relevancia para ser aprovechadas, ya sea tanto para el consumo humano como para el abrevado de animales o el riego de huertas, es decir, lo productivo. Aunque para que dicho aprovechamiento sea viable y garantizar su sustentabilidad es necesario tener en cuenta aspectos sociales (como usos, costumbres, fortalezas y debilidades dentro de la comunidad), técnicos (como métodos y tecnologías apropiadas a aplicar), económicos (como los costos de inversión y beneficios obtenidos por haber llevado a cabo la obra), legales (como derechos y obligaciones a cumplir por parte de cada uno de los actores intervinientes en el proyecto) e incluso institucionales (como responsabilidades y compromisos asumidos

para con la comunidad en sí). Este análisis multidimensional debería ser conducente para alcanzar una adecuada gestión del recurso hídrico.

Al considerarse las metas y componentes del marco lógico de la GIRH, en el presente trabajo se plantea el siguiente objetivo general: lograr una gestión equitativa, sostenible y eficiente del abastecimiento de agua segura para pequeñas localidades del noroeste de la Provincia de Santa Fe. Los objetivos específicos que se proponen son: (i) elaborar un diagnóstico del estado actual del abastecimiento de agua potable en la región del noroeste santafesino, sobre la base de la caracterización de la demanda de las comunidades, la oferta hídrica de la zona en el marco de la política hídrica del gobierno provincial. (ii) Desarrollar una propuesta de acción para un caso piloto sobre la base del estudio en el Paraje Santa Lucía, que incluya el diseño de las acciones estructurales y las medidas no estructurales que atiendan a la gestión integrada del recurso hídrico.

2. METODOLOGÍA

Se basa principalmente en el concepto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), es decir, en el proceso de adecuación, fomento y creación de un ambiente propicio para lograr la participación efectiva de los actores, instrumentos de gestión y roles institucionales claramente definidos, que promuevan el logro de las metas para la asignación social equitativa de los recursos bajo una concepción económica eficiente y que a su vez garantice la sostenibilidad ambiental. Así los componentes de la GIRH: ambiente propicio, roles institucionales e instrumentos de gestión deberían adecuarse para el cumplimiento de las metas considerando las particularidades de la problemática del abastecimiento de agua en el Paraje. A su vez, los Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina (PRPHRA) también han sido considerados para brindar lineamientos que permitan integrar aspectos técnicos, sociales, económicos, legales, institucionales y ambientales del recurso hídrico de forma de garantizar una gestión eficiente y sustentable de dicho recurso. De acuerdo al abordaje de la investigación bajo la visión de la GIRH, para el logro de los objetivos planteados la metodología se basó en:

- Recopilación y análisis de antecedentes, los que a su vez se han dividido en tres aspectos que se consideran relevantes para la investigación:

- Estudios, datos e informes de investigaciones previas que contribuyan a la caracterización de la oferta hídrica de la zona y de la demanda por parte de las comunidades.
- Avances en la tecnología para cosecha de agua de lluvia.
- Adopción social de tecnologías en agua y saneamiento.
- Diagnóstico del estado actual del abastecimiento de agua potable en el noroeste santafesino.
- Propuestas de acción. Las cuales consistieron en el desarrollo de:
 - Acciones estructurales.
 - o Diseño y dimensionamiento de Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia (SCALL).
 - Medidas no estructurales.
 - o Buenas prácticas de operación y mantenimiento de los SCALL.
 - o Calidad del agua. Tratamientos necesarios para hacerla segura a la hora de su ingesta.
 - o Políticas de Estado del Gobierno Provincial.
 - o Marco legal e institucional.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los antecedentes de estudios, datos e informes de investigación previos se puede decir que:

- La principal oferta hídrica aprovechable en la zona está dada por la ocurrencia de las precipitaciones.
- La fuente de agua subterránea generalmente es de mala calidad debido a las altas concentraciones de sales y arsénico, donde predominan las aguas cloruradas sulfatadas sódicas o sulfatadas cloruradas sódicas.
- La irregularidad de las precipitaciones (intensidad, duración y espacialidad), las características geomorfológicas del suelo (baja permeabilidad) y el relieve (escasa pendiente) hacen que se generen escenarios tanto de anegamiento como de sequía. Situaciones que se ven potenciadas desfavorablemente debido a las acciones antrópicas, es decir, a la intervención del

hombre que a través de la canalización de esteros y zonas bajas sin una adecuada gestión, la agricultura con la expansión de la actividad agrícola y el inadecuado manejo de la ganadería, entendiéndose por tal a la quema sin control de pastizales y sobre pastoreo en zonas delicadas hacen justamente que dichas acciones tengan un impacto mayor en el medio debido, por ejemplo, al incremento del escurrimiento superficial, que facilita un mayor arrastre y lavado de los suelos, a la vez que genera zonas de erosión y otras de sedimentación.

- La práctica de recarga artificial del acuífero en zonas de paleocauces, es decir, el aprovechamiento del agua de lluvia en perfiles con un cierto porcentaje de arena, ha dado resultados satisfactorios mejorando la calidad del agua subterránea (disminución de la concentración de sales), permitiendo así un mayor aprovechamiento de dicha fuente.

En lo que hace a los antecedentes sobre el avance en la tecnología para la cosecha de agua de lluvia. Vale aclarar que:

- La misma consiste en captar el agua de las precipitaciones caídas sobre superficies impermeables como ser techos de viviendas o suelos de muy baja permeabilidad, arcillosos por ejemplo, y conducirlos hasta un depósito que puede ser un aljibe, si se trata de agua destinada a consumo humano o una represa si

es para producción, donde va a ser almacenada para su posterior utilización.

- En este sentido, si se trata de agua destinada para consumo humano, para lograr un adecuado almacenamiento de la misma es deseable que ésta sea filtrada previamente a su ingreso al aljibe. De esta forma, al evitar la incorporación de materia orgánica, insectos y/o sedimentos que suelen encontrarse depositados en las áreas de captación (techos) se asegura no solo la calidad del agua que se almacene sino también la eficiencia del tratamiento que se emplee previo a su ingesta.
- Si bien, los aljibes, pueden tener diferentes formas y tamaños, lo aconsejable es que sean cilíndricos para asegurar una distribución uniforme de presiones y minimizar puntos críticos que impliquen riesgos en su estructura.

En la siguiente figura 2, se muestra un SCALL típico donde se aprecia el techo de la vivienda que obra de área de captación, la canaleta de recolección con su respectiva puntera y bajada, la cañería de conducción, el sistema de filtrado, el aljibe, con su acceso (tapado), cañería de excedentes y mecanismo de extracción del agua, que en este caso en particular consiste en una bomba manual debido justamente a que, como se mencionó anteriormente, en ambiente rurales el suministro eléctrico no está garantizado.



Figura 2. Sistema de captación y aprovechamiento del agua de lluvia

Por el lado de los antecedentes en adopción social de tecnologías en agua y saneamiento.

- Se debe partir de un trabajo previo en terreno teniendo en cuenta, desde un principio, la comunidad destinataria en lo que refiere a sus tradiciones, conocimientos, fortalezas y debilidades, lo que permitirá en forma conjunta, no solo detectar el problema, definir objetivos y metas, proponer la tecnología más acorde a dicho escenario socio-ambiental sino que también definir la estrategia de adopción de dicha tecnología.
- De la mano del punto anterior se puede mencionar que, en una inadecuada gestión hasta la tecnología más acorde adoptada termina siendo inapropiada. Esto puede ser debido a una falta de compromiso, es decir, desinterés por parte de los beneficiarios, desconocimiento del tema o una deficiencia de recursos financieros. Es decir que en algunos casos, dicha tecnología puede llegar a resultar una imposición.

Como se mencionó anteriormente y siguiendo con el segundo punto de la metodología que trata sobre el estado del abastecimiento de agua potable en el noroeste santafesino y teniendo en cuenta el caso de estudio del Paraje de Santa Lucía, se puede decir que, el agua subterránea tiene un alto contenido de sales, esto hace que su calidad sea muy mala, al punto tal que si no es tratada se torna inutilizable para el consumo tanto de las personas como de los animales y el riego de huertas. En tanto que, la superficial directamente no es tenida en cuenta debido a que se encuentra a un par de kilómetros de dicho paraje y al igual que la subterránea, no solo que su calidad no es buena, sino que en épocas de estiaje la misma puede desaparecer debido a que no se trata de un curso de agua permanente sino de una cadena de bañados.

En la actualidad la población cuenta con dos fuentes de abastecimiento. Una de ella es la pequeña planta de ósmosis inversa instalada en el paraje y la otra es la brindada por el municipio de la ciudad de Vera a través de un camión cisterna. En el caso de la planta de ósmosis, la misma abastece a una precaria red de distribución comunitaria la cual posee un par de canillas distribuidas de forma dispersa dentro del paraje de donde la población debe proveerse. Como se mencionó, el inconveniente que presenta es que al ser de baja producción no alcanza a satisfacer la demanda. Además, al carecer de un adecuado

mantenimiento, sobre todo en lo que respecta al recambio de sus membranas, su eficiencia se ve disminuida y junto con los repentinos y frecuentes cortes del suministro eléctrico, que suelen darse sobre todo luego de tormentas o lluvias importantes, acentúan aún más sus limitaciones.

En tanto que, la fuente de abastecimiento proveniente de la ciudad de Vera a través del camión cisterna también presenta sus inconvenientes ya que, como se adelantó, para poder acceder al paraje hay que transitar por caminos rurales de calzada natural que en caso de ocurrencia de alguna precipitación se tornan intransitables, incluso en días posteriores al del acontecimiento del fenómeno, quedando de esta forma el paraje sin la prestación de este servicio por tiempo indeterminado. A su vez, en los períodos de mayor demanda (verano), se torna complejo garantizar los pedidos ya que dicho camión también debe abastecer a otras comunidades de la zona.

En este sentido, en lo que hace a la disponibilidad de agua meteórica, justamente por los inconvenientes mencionados anteriormente es que toman importancia las precipitaciones que se producen en la zona. De este modo, contando con el registro de datos de lluvias que dispone el Centro Operativo Experimental (Aldo Emilio Tessio) emplazado en el Establecimiento Las Gamas, es decir, un registro de datos muy próximos al caso de estudio con una longitud de más de 100 años, algo poco común pero si altamente deseable, ya que es fundamental contar con un registro confiable y lo más extenso posible de forma de contemplar períodos húmedos o secos que puedan llegar a ocurrir, se pudo determinar no solo la precipitación media anual de dicha serie, que fue de 1.034 mm, sino también la precipitación anual de diseño (figura 3) y el período de no cosecha, es decir, el período considerado como de no ocurrencia de precipitaciones capaces de ser aprovechadas por el sistema. De esta forma, para el caso de la precipitación anual de diseño, se empleó un coeficiente de captación que contempló varios factores como ser pérdidas por salpicadura, viento, evaporación, fricción y tamaño de gota, del 80 %, que según referentes internacionales en el tema, es más que suficiente para resguardarse en el diseño de este tipo de obras. En este sentido, el valor obtenido fue de 827 mm. En tanto que, para el período de no cosecha, cabe aclarar que el monto de dichas precipitaciones fue fijado teniendo en cuenta también bibliografía internacional, en 50 mm. Lo que arrojó un período de

5 meses (figura 4) al cual se le ha sumado uno más para mayor seguridad. Es así que, se considera que durante 180 días no se producirán precipitaciones

aprovechables, lo que implica por lo tanto, que el sistema debe satisfacer la demanda durante dicho período crítico.

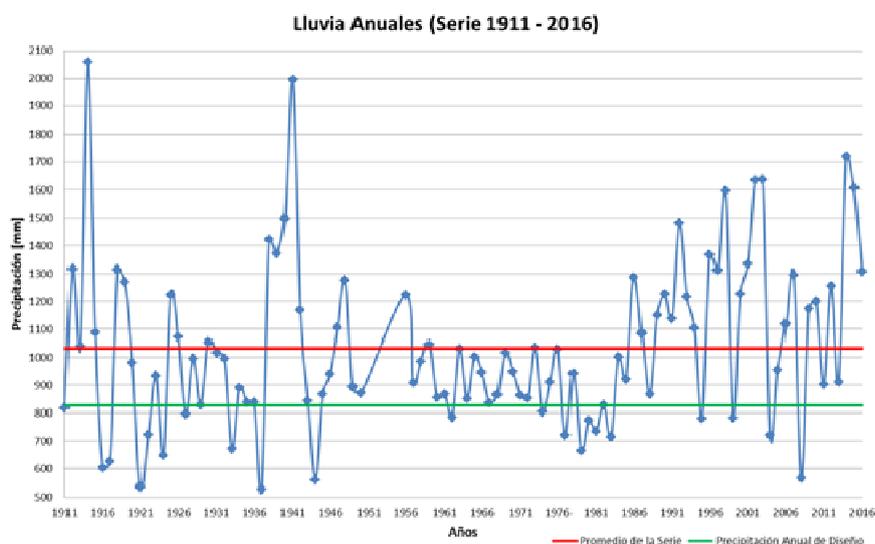


Figura 3. Gráfico de precipitaciones anuales de la serie 1911-2016, Promedio de la serie y precipitación anual de diseño

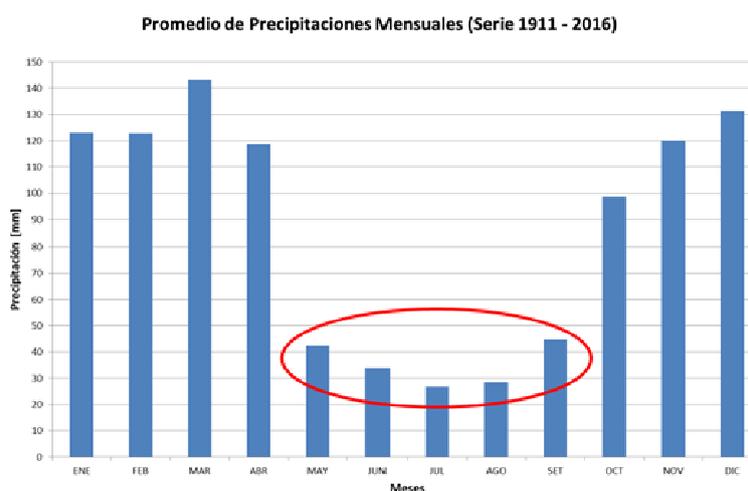


Figura 4. Período de lluvias no aprovechables por el SCALL

Tabla 1. Composición de la dotación considerada

Destino	Dotación [l/hab.día]
Bebida	3
Cocción de alimentos	2
Higiene personal	5
	10

Para la caracterización de la demanda de agua se tuvieron en cuenta los actores intervinientes del paraje, es decir, todos aquellos habitantes del mismo que demostraron interés en la implementación y apropiación de la tecnología propuesta. Es así que, del relevamiento que se realizó a campo se pudo determinar, no solo la cantidad de habitantes del Paraje (260 personas aproximadamente) sino la de cada hogar entre otras cuestiones. Además, teniendo en cuenta lo que recomiendan organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) o la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), en lo que refiere al consumo de agua por persona por día, se adoptó una dotación de 10 l/hab.día, lo que permitió la determinación de la demanda de cada hogar. Vale remarcar que la adopción de dicha dotación es exclusivamente para ser destinada a bebida, cocción de alimentos e higiene personal de la siguiente manera (tabla 1). Considerando lo anterior y agrupado a los hogares dependiendo la cantidad de sus integrantes se lograron determinar 4 grupos: (i) Hogares con hasta 2 integrantes. (ii) Hogares con hasta 4 integrantes. (iii)

Hogares con hasta 6 integrantes. (iv) Hogares con más de 6 integrantes.

Esto permitió determinar la demanda de cada uno de los grupos de hogares durante el período crítico (tabla 2). Se constató que la mayoría de los techos son de chapas de zinc y se encuentran en buen estado, y que disponen de letrinas alejadas de la vivienda. A su vez, se aprovechó para determinar los lugares más adecuados en donde ubicar los aljibes. Para lo cual, se tuvo en cuenta por el lado de la seguridad en lo que respecta a la calidad del agua almacenada, que los mismos deben estar lo más lejos posible de potenciales fuentes contaminantes como ser pozos sépticos, letrinas, gallineros, corrales, etc., y por el lado de la integridad estructural de la obra, de raíces de árboles y plantas. De esta forma, teniendo en cuenta la superficie de captación promedio (techos de los hogares), la lluvia anual de diseño y la dotación diaria adoptada por habitante se pudo determinar tanto el volumen anual posible de ser cosechado como el consumo anual por tipo de hogar y la diferencia entre éstos últimos (Tabla 3). Del relevamiento a campo también se pudo diagnosticar el estado de la infraestructura de los hogares.

Tabla 2. Determinación de la demanda por grupo de hogar durante el período de lluvias no aprovechables para la cosecha de agua

Grupo	Hab. por hogar	Cant. de hogares	Cant. de hab.	Dotación adoptada [l/hab.día]	Consumo diario [l/hog.día]	Días s/ lluvias aprov.	Consumo período crítico [l/hogar]
1	1 a 2	21	28	10	20	180	3600
2	3 a 4	20	73	10	40	180	7200
3	5 a 6	12	65	10	60	180	10800
4	+ de 6 (*)	13	99	10	80	180	14400

(*) El cálculo se realizó para un hogar con 8 integrantes

Tabla 3. Determinación de volumen cosechado y consumos anual por tipo de hogar

Grupo	Hab. Por hogar	Dotación Adoptada [l/hab.día]	Consumo Calculado [l/hog.día]	Sup. Cap. Prom. [m ²]	Precip. Diseño [mm/año]	Vol. Cosech. [l/año]	Cons. Calc. [l/año]	Vol Cos - Cons Cal [l/año]
1	1 a 2	10	20	65	827	53755	7300	46455
2	3 a 4	10	40	51	827	42177	14600	27577
3	5 a 6	10	60	66	827	54582	21900	32682
4	+ de 6 (*)	10	80	63	827	52101	29200	22901

(*) El cálculo se realizó para un hogar con 8 integrantes

Como puede apreciarse, el posible volumen de agua que se puede llegar a cosechar durante todo el año, teniendo en cuenta la superficie promedio de los techos de los hogares y la lluvia anual de diseño determinada, es más que suficiente para satisfacer la demanda de las familias en dicho periodo. Con toda la información que se ha podido relevar y los cálculos que se han llevado a cabo se propusieron las medidas estructurales y las acciones no estructurales. En este sentido, las medidas estructurales consistieron en el diseño y construcción de aljibes a la demanda de cada hogar según el número de integrantes de las mismas. Concretándose de esta forma:

- Aljibes de 3,500 litros de capacidad para hogares con hasta 2 integrantes
- Aljibes de 7,000 litros de capacidad para hogares con hasta 4 integrantes
- Aljibes de 11,000 litros de capacidad para hogares con hasta 6 integrantes
- Aljibes de 15,000 litros de capacidad para hogares con 8 o más integrantes

Algo no menor, si se quiere lograr la sostenibilidad de este tipo de sistemas, es tener en cuenta las siguientes consideraciones a la hora de implementar, operar y mantener un SCALL:

- a. La superficie de cosecha debe estar en condiciones de captar toda el agua de lluvia posible que caiga sobre la misma, es decir, no debe estar agujereadas, rajada o rota.
- b. Las canaletas de recolección deben estar bien colocadas y amuradas, con la pendiente en el sentido correcto. Además, deben contar con su correspondiente cabecera y ser del tamaño adecuado para evitar rebalses.
- c. El número de bajadas (bocas de descarga), debe ser el suficiente para facilitar el desagote de las canaletas. En este sentido, se aconseja una bajada cada 50 metros cuadrados de superficie a desagotar.
- d. Las cañerías de conducción deben ser del diámetro correcto de forma de evitar taponamientos u obstrucciones que reduzcan el escurrimiento o produzcan pérdidas por rebalses.
- e. En lo que respecta al sistema de filtrado.
 - El decantador debe contar con una malla mosquitero, tejido pajarero o rejilla metálica que actúe como pre filtro de materiales sólidos como pueden serlo hojas, palitos, bichos, heces de pájaros o cualquier otro tipo de elemento que pueda encontrarse depositado en el techo y ser arrastrado por el agua. Siempre debe estar desagotado y limpio antes de

que se produzca la precipitación. De este modo, se evitará el ingreso del agua estancada que haya quedado del último evento, con lo cual, se asegura que el agua que se vaya a almacenar en el aljibe sea la que recién se haya captado y por lo tanto no haya tenido la oportunidad de estar en contacto con ningún roedor, pájaro, materia orgánica, etc. que pudiera haber caído en dicho compartimento en caso de carecer de dicho pre filtro o encontrarse dañado.

- La zona filtrante (manto arenoso, cuyo tamaño del grano es de 1 a 2 mm) debe estar limpia, para lo cual es importante que la capa superior de la misma haya sido lavada luego de un determinado tiempo de operación del filtro, ya que con las sucesivas lluvias, el sedimento arrastrado desde la superficie de captación y que no ha quedado retenido en el decantador se va depositando en la misma. La limpieza es sencilla, y consiste en remover la parte superior de dicha capa para lavarla con agua. Una vez limpia se la vuelve a colocar en su lugar. En caso de que se vaya perdiendo dicho material, el mismo debe ser repuesto de forma de mantener el espesor mínimo (30 cm) que asegure el filtrado del agua que ingresa.
- f. En cuanto al aljibe, es fundamental que sea estanco, sin olvidarse que debe contar con un acceso que permita el ingreso de una persona a su interior para poder realizar limpiezas periódicas y posibles reparaciones. A su vez, dicho acceso debe contar con una tapa sólida que evite el ingreso de luz, motivo que favorece la proliferación de vegetación, además de impedir el ingreso de animales, roedores, materia orgánica o cualquier otra cosa que en contacto con el agua almacenada pueda comprometer su calidad. En este sentido, también se reduce el riesgo de posibles accidentes ante la caída en su interior sobre todo de algún niño, ya que estos suelen ser más inquietos y desconocer el peligro que implica un depósito destapado esté o no con agua. Por todo ello, se aconseja que dicha tapa sea de un material resistente (losa de hormigón, chapón, etc.) y cuente con un sistema de traba. En tanto que la limpieza debe realizarse cada vez que se detecte suciedad en su interior recomendándose como mínimo una vez por año antes del comienzo del período de lluvias, de esta forma, es más probable que el aljibe contenga poca agua y por lo tanto la que haya

que extraer para vaciarlo sea mínima. Limpieza en la cual es recomendable se utilice lavandina para desinfectar tanto sus paredes como su fondo. También, un dato no menor, es controlar el estado de la malla que se haya utilizado en el caño de excedente para impedir el ingreso de insectos y/o roedores al mismo.

g. Por el lado de los diferentes tratamientos necesarios realizarle al agua para considerarla segura antes de su ingesta se pueden nombrar los siguientes:

- Hervido: hervir el agua a tratar de 3 a 5 minutos es suficiente para matar los agentes patógenos que pueda contener.
- Dosificación con cloro (lavandina): aplicando una gota de lavandina, apta para la desinfección del agua (esto es, sin ningún tipo de aditivo), de buena calidad, cada dos litros de agua limpia a tratar y dejándola actuar durante 30 minutos es suficiente para asegurar que los microorganismos que pudieran existir hayan sido eliminados.
- SODIS (Solar Disinfection): es un método de desinfección del agua que utiliza los rayos ultra violeta del sol. Consiste en llenar con el agua a tratar botellas plásticas transparentes en buen estado de conservación y exponerlas al sol de forma directa. De esta forma, dichos rayos actuarán sobre los microorganismos presentes en la muestra. Para un mejor efecto, es recomendable que el agua se encuentre lo más transparente posible, es decir, con bajo grado de turbiedad. Hay que dejarla expuesta al sol durante un día (en días soleados) o dos en días nublados.
- Ósmosis inversa: es un tratamiento que consiste en hacer pasar el agua a tratar por membranas de determinadas características donde quedan retenido tanto los microorganismos como los elementos químicos presentes.

h. Cada alternativa de tratamiento tiene sus aspectos positivos y negativos:

- El hervido: es fácil y eficiente, solo que consume energía ya sea eléctrica,

gasífera o de biomasa, es decir que, implica un cierto costo que, si bien puede no ser elevado hay que considerarlo. El mayor inconveniente se puede dar en ocasiones donde no se disponga o no se tenga acceso a dicha fuente energética. Además, no posee poder residual, lo que implica un mayor cuidado en su almacenamiento posterior a su tratamiento.

- La dosificación con cloro (lavandina): es simple, eficiente y posee poder residual, lo que asegura que, ante la presencia de nuevos agentes patógenos, el cloro actuará matando los microorganismos no deseados. El conocimiento requerido por parte de la persona que vaya a implementar dicho tratamiento es casi nulo, solo debe colocar la cantidad (dosis) de lavandina correcta. Presenta un muy bajo costo, solo que en algunas zonas, sobre todo aquellas rurales alejadas de centros urbanos, hay que asegurar su provisión y no se debe llevar a cabo una sobredosificación ya que no solo le dará un gusto desagradable sino que va a producir inconvenientes en el sistema digestivo de aquel que la ingiera, y por el contrario, una dosificación insuficiente, no garantiza la eliminación de los microorganismos que se encuentren presentes.
- La SODIS: es eficiente, no demanda ningún tipo de energía o inversión inicial que incurra en costos ya que emplea los rayos ultravioleta del sol, de nula complejidad de operación y mantenimiento, pero si es un tratamiento que demanda un cierto tiempo, como se comentó anteriormente. Además, tampoco posee poder residual, es por ello que se recomienda que el agua sea consumida directamente desde las propias botellas. Otra cuestión no menor es reemplazar dichas botellas plásticas cada tres o cuatro veces de ser usadas debido a que los rayos ultravioletas también degradan el material.
- La ósmosis inversa: es muy eficiente ya que no solo elimina elementos químicos sino que también los microorganismos

presentes en el agua tratada, pero tiene desventajas significativas ya que demanda una importante inversión inicial, requiere de personal capacitado para su operación y mantenimiento y para su funcionamiento depende del suministro eléctrico, que muchas veces, en zonas rurales, es deficiente o incluso se carece del mismo. Además no posee poder residual.

Las medidas no estructurales, se adoptaron aquellas que apuntaron sobre todo a la adopción social de la tecnología propuesta. Las cuales contemplaron:

- a. El reconocimiento de actores. Donde se tuvo en cuenta a todas aquellas instituciones, organismos y agrupaciones presentes en el medio y con directa relación en las actividades que se desarrollan en torno al Paraje (tabla 4). Para ello, se realizaron reuniones justamente con el fin de identificarlos, determinar sus incumbencias, roles, actividades y nivel de participación. En este sentido, se logró formar un equipo interinstitucional e interdisciplinario, algo no muy común pero si muy deseado por la fortaleza que da el hecho de tener diferentes visiones, capacidades, etc. Luego de haber acordado la modalidad de intervención en el terreno, se coordinó la primera visita a la comunidad con el fin de comentarles la propuesta del proyecto. Para esto, se realizaron talleres grupales sobre temas tales como: dificultades o temores que tenían respecto de dicho proyecto, que esperaban del mismo, qué podían ofrecer o proponer como vecinos del paraje y beneficiarios de las obras y cualquier otra sugerencia que se les ocurriese debiera ser tenida en cuenta. En tanto que, en talleres posteriores se conformaron los grupos de trabajo, es decir, la cuadrilla que se iba a dedicar a la construcción de los aljibes ya que, el proyecto, que en un principio contemplaba la contratación de mano de obra finalmente no lo hizo, lo que derivó en la conformación de dichos grupos como contra parte junto con la participación de cada familia a la cual se le pidió que cavara el pozo y acarreará los materiales necesarios para concretar la obra.
- b. Desarrollo de capacidades. Consistieron, en un principio, en la implementación del

programa de entrenamiento laboral de la Nación en lo que refiere a la construcción de los SCALL. Esto surgió justamente debido a lo comentado anteriormente sobre el tema de la mano de obra de los beneficiarios como contra parte del proyecto. En este sentido, se hicieron diversos talleres prácticos con los grupos constructores conformados en su mayoría por jóvenes de la comunidad con cierto conocimiento en la construcción. En una primera instancia, se los capacitó en el armado de las estructuras de hierro necesarias para la consolidación del aljibe. Y en una posterior, ya a lo que es la construcción del aljibe propiamente dicha. Algo similar sucedió luego de haberse concretado la totalidad de las obras solo que en esta oportunidad, los capacitados fueron los propios beneficiarios, es decir las familias, en lo que refiere a la adecuada operación y mantenimiento de los mismos, remarcando la importancia de almacenar el agua lo más limpia posible para facilitar y hacer más eficiente el posterior tratamiento microbiológico que se debe realizar para asegurar un agua de calidad que no los enferme conformando esto último la segunda etapa de las capacitaciones que se han realizado.

- c. Organización de usuarios (figura 5). Por último, se abordó la importancia de conformar una comisión o asociación vecinal donde se fijen criterios y se tomen decisiones de forma priorizada en lo que respecta sobre todo al mantenimiento de los sistemas, como también a estructuras de inversión y financiamiento y, donde se implementen y prevean, entre otras cuestiones, las políticas y la eventual adecuación al marco legal que surja de la reglamentación de la Ley de Aguas de la Provincia de Santa Fe (Ley 13.740). En este sentido, se recomendó que dicha comisión esté compuesta por un representante de cada barrio que presente interés en participar y que tenga el aval de sus pares, un agente del gobierno local, con cierto conocimiento en el tema, y uno por cada institución u organismo que se encuentre más vinculado con las actividades que se desarrollan en el Paraje, de forma de que no solo los intereses de los representados estén presentes a la hora de toma de

decisiones sino que también exista el apoyo y acompañamiento por parte de dichas instituciones y organismos sobre todo al momento de gestionar algún tipo de decisión que implique un grado de intervención más compleja que pueda exceder la capacidad de participación del representante por parte de los vecinos. En tanto que, para el funcionamiento y consolidación de dicha comisión se piensa como estrategia, en la creación de un fondo financiero a través de aportes mínimos o colaboraciones voluntarias por parte de los beneficiarios de los sistemas para afrontar el mantenimiento, reparación o

concreción de futuras obras que haya que llevar a cabo. Se piensa que sería bueno, en una primera instancia, que la coordinación de esta comisión la lleve adelante la ONG FUNDAPAZ por ser la organización que viene trabajando desde años en este tipo de ambientes y por el conocimiento que tiene en particular de este Paraje. Si posteriormente, sería conveniente que la coordinación quede a cargo de alguna institución o grupo de instituciones con presencia en el mismo Paraje, pudiendo ser éstas, el Centro de Salud, la Escuela o la Comisaría.

Tabla 4. Detalle de los actores intervinientes en el desarrollo del proyecto

Actor	Nivel al que pertenece	Rol	Actividad desarrollada	Nivel de vinculación
Subsecretaría de Agricultura Familiar de la Nación	Nacional	Diseño de planes, programas y proyectos para promover la capacidad productiva de la agricultura familiar fortaleciendo las condiciones para el desarrollo local y regional.	Relevamiento en campo. Seguimiento de la construcción de los sistemas.	Alto
Ministerio de Producción y Trabajo de la Nación	Nacional	Gestión de política nacional en materia de relaciones laborales, empleo y seguridad social.	Aprobación del programa de entrenamiento laboral.	Bajo
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria	Nacional	Investigación/desarrollo, transferencia/extensión, vinculación tecnológica y relaciones institucionales.	Gestión del proyecto de Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia (SCALL). Diseño y dirección de las obras proyectadas. Capacitación en buenas prácticas de manejo de los sistemas y diferentes tratamientos para obtener un agua segura para el consumo humano.	Alto
FUNDAPAZ	Regional	Desarrollo rural sustentable con comunidades indígenas y familias campesinas.	Facilitador en terreno de las actividades sobre todo de gestión del grupo constructor y de los propios beneficiarios.	Alto
Ministerio de Infraestructura y Transporte (Secretaría de Aguas y Saneamiento)	Provincial	Planificación y definición de la política hídrica a nivel provincial. Estudio, proyecto, ejecución, mantenimiento, operación y administración de las obras públicas hidráulicas; de obras de prevención y defensa contra las inundaciones y de la defensa de las costas y de obras sanitarias, de agua, de evacuación de efluentes cloacales y pluviales.	Consultas/entrevistas a referentes claves sobre la política de estado del gobierno provincial sobre todo en lo que refiere al abastecimiento de agua para las pequeñas localidades rurales y, el marco legal e institucional de la provincia.	Medio

Municipalidad de Vera	Municipal	Política/administrativa.	Acompañamiento/logística en las actividades relacionadas a la concreción de las obras proyectadas.	Alto
U.O.C.B.	Local	Promoción del trabajo local de pequeñas familias de productores.	Facilitador en terreno a través de su referente territorial.	Alto
Instituciones locales	Local	Educación, seguridad, salud.	Fueron consultadas/visitadas en una primera instancia (pre-proyecto).	Bajo
Capataz de Obra	Local	Dirección de los grupos constructores.	Coordinador de los grupos y actividades relacionadas a la construcción de los SCALL.	Alto
Grupo Constructor	Local	Construcción de SCALL.	Responsables de la construcción de los aljibes y demás obras complementarias.	Alto
Beneficiarios	Local	Mayormente familias de productores de subsistencia.	Responsables del cavado del pozo y acarreo de materiales hasta sus domicilios para que el grupo constructor pueda comenzar con la obra.	Alto

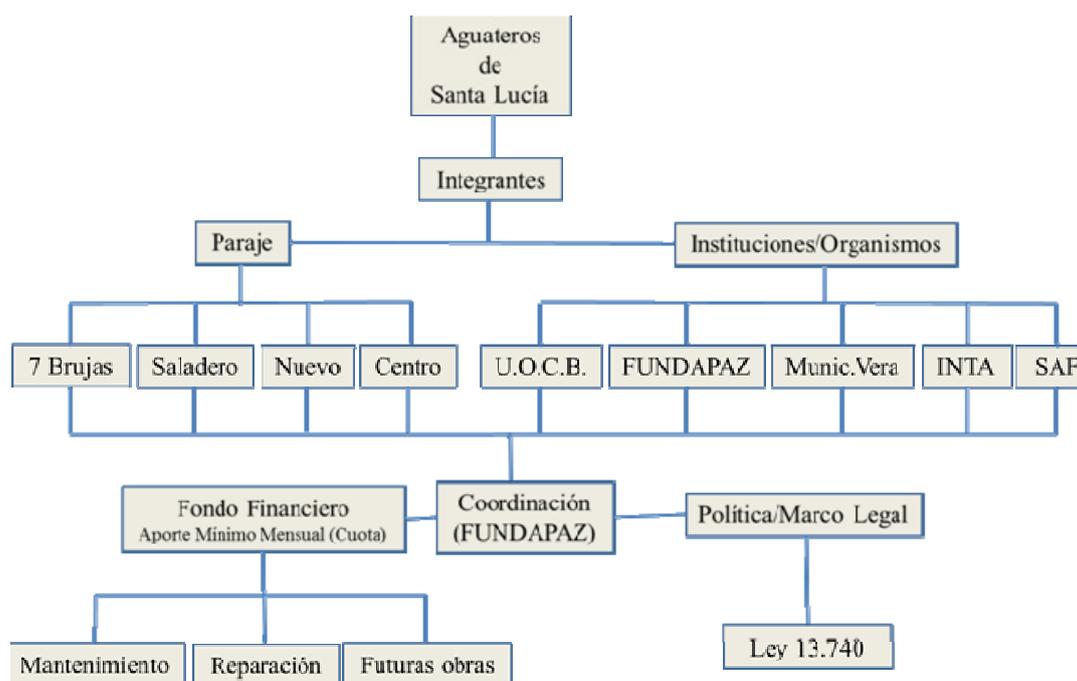


Figura 5. Organigrama propuesto para la Comisión "Aguateros de Santa Lucía"

4. CONCLUSIONES

Las siguientes consideraciones que deberían ser tenidas en cuenta a la hora de proyectar y replicar la experiencia en otras pequeñas localidades no solo del noroeste santafesino sino de cualquier paraje donde se garanticen los requerimientos de este tipo de

sistemas, de modo tal de que constituyan un plan de gestión integrada del abastecimiento de agua segura para la población.

El diagnóstico realizado del estado del sistema de abastecimiento de agua potable del paraje de Santa Lucía refleja una realidad que se repite en varias

pequeñas localidades del norte santafecino, donde el principal condicionante es la falta de mantenimiento de los mismos que junto con el incremento de la población, en algunos casos, hacen que con el paso del tiempo éstos queden subdimensionados funcionando de manera deficiente e incluso quedando obsoletos. Si bien, no existe un factor único que dé respuesta a lo comentado, algunas cuestiones podrían ser la falta de planificación, gestión, priorización o recursos. Lo cierto, es que la necesidad y el padecimiento están presentes de forma continua en varios lugares.

Por el lado de los actores en terreno, entendiéndose por tales a decisores políticos, autoridades de aplicación, organismos gubernamentales y no gubernamentales y sociedad civil en general, debería existir un mayor interés y compromiso por revertir esta situación. El acompañamiento continuo, de éstos, es fundamental para lograr los objetivos planteados. Esta falencia es algo que se pudo apreciar claramente en el lugar de estudio no por parte de los organismos e instituciones del medio sino por parte de las propias familias beneficiadas ya que fueron muy pocas las que verdaderamente tuvieron una actitud participativa tanto para que las obras se concretaran como para capacitarse en lo que hace a la operación y mantenimiento del SCALL como así también en lo que respecta a los posibles tratamientos que se le debe realizar al agua para considerarla segura a la hora de su ingesta.

Tanto el acceso al agua potable como al de otros servicios básicos en este tipo de comunidades siempre ha sido un tema relegado, sobre todo por los decisores políticos, que al priorizar su gestión en otros sitios de mayor trascendencia regional, avanza de forma muy lenta pesando en el bienestar de su comunidad, que debe padecer dichas deficiencias, lo que les impide alcanzar un mejor nivel de vida. Situación, que con el correr del tiempo en ocasiones hace que varias familias abandonen sus lugares de origen en busca de un horizonte más prometedor. Siendo éste, en la mayoría de los casos, la ciudad donde allí suelen encontrarse con un importante inconveniente de inserción laboral y social. De allí la importancia de este tipo de gestiones donde más allá de satisfacer una demanda elemental como lo es el acceso a una fuente de agua segura para el consumo de las personas, teniendo en cuenta la sostenibilidad del recurso, también es el de mejorarles la calidad de vida y evitar de esta forma que se produzcan dichas migraciones.

La oferta hídrica, dada por el aporte de las precipitaciones con que cuenta la región, es una opción tan válida como lo pueden ser otras fuentes de abastecimiento convencional como ser la subterránea o superficial, en aquellos casos donde sea posible ser aprovechada. Ésta, es suficiente para satisfacer la demanda de agua para la ingesta de la población allí radicada, ya sea aprovechada de forma comunitaria como individual o grupal por hogar como lo fue en el caso de estudio planteado. Solo será cuestión de recopilar la mayor cantidad de datos pluviométricos posible (mínimo 30 años), preferentemente provenientes de fuentes confiables, para poder determinar la potencial oferta (lluvia de diseño) que permitirá calcular la superficie necesaria para satisfacer la demanda que se proponga.

La determinación de la demanda de agua segura para el consumo humano, en este tipo de sistemas, es decir, en los destinados a captar y aprovechar el agua de lluvia, siempre es aconsejable que se la realice en base a una dotación diaria mínima por persona que satisfaga las necesidades básicas de ingesta, cocción de alimentos e higiene personal. Para ello, existen tablas establecidas por diferentes organismos nacionales e internacionales que pueden ser utilizadas de forma orientativa para tal fin. En este punto, es fundamental remarcar que el destino prioritario es de satisfacer la demanda de las personas. Si se logró garantizar dicho fin, recién ahí, se puede pensar en abastecer a pequeños animales de granja como ser gallinas, chivos, ovejas, cerdos, etc. o regar alguna huerta que se disponga y que generalmente suelen poseer estos tipos de comunidades rurales para su subsistencia.

En lo que hace a las medidas estructurales, las mismas deben ser diseñadas teniendo en cuenta en principio la oferta hídrica (lluvias) con la cual se cuenta en el lugar o lo más próximo al mismo, de allí la importancia de contar con una base de datos lo suficientemente larga y confiable, y posteriormente la superficie existente destinada a captarla (techos). Paralelamente, es fundamental contar con el dato de la cantidad de personas que se van a abastecer (demanda) empleando esa superficie. Esto permitirá corroborar si la misma es suficiente o no para garantizar dicha demanda. En caso de no serlo, se deberá calcular la superficie extra necesaria a construir. Con esos datos se está en condiciones de diseñar el SCALL más adecuado que contemple las condiciones ambientales y edificaciones existentes y que satisfaga la demanda calculada para la comunidad.

En relación con este tema y de la mano de las medidas no estructurales, una cuestión que no es menor y que en muchos casos hace a la viabilidad de un proyecto o propuesta, es que aquella tecnología que se decida implementar esté probada y validada con anterioridad y que sea apropiada por la comunidad donde se la vaya a implementar. Aquí, lo aconsejable es que exista un trabajo de terreno previo con la comunidad en conjunto con asistentes sociales y/o agentes sanitarios, es decir, con personal más capacitado para el trato con las personas, de forma de que se sientan partícipes a medida que se van capacitando por ejemplo en la importancia que tiene el hecho de contar con una fuente de agua segura para su consumo y familiarizando con dicha propuesta. En este sentido, las medidas deben

garantizar no solo los intereses de los directos participantes, es decir de los actores en terreno, teniendo en cuenta sus roles, capacidades, responsabilidades, fortalezas y/o debilidades sobre todo de aquellos grupos más vulnerables, en pos de la equidad social, sino que también la sostenibilidad del recurso dentro de un marco de eficiencia económica. Todo ello, podrá ser alcanzado si se parte de una buena identificación y caracterización de dichos actores, cosa que permitirá definir estrategias de participación e intervención para con los mismos, un correcto y actualizado diagnóstico de la situación económica, social y ambiental del lugar con el fin de implementar el plan de gestión integrada del abastecimiento de agua que mejor se adapte.

REFERENCIAS

- Anaya Garduño, M. (2011). Captación del agua de lluvia. Solución caída del cielo. Primera Edición. México.
- Basán Nickisch, M.; Sánchez, L.; Tosolini, R. Tejerina Díaz, F.; Jordan, P. (2018). Sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano, sinónimo de agua segura. *Revista Aqua-LAC*, Vol. 10: 15-25.
- Bernascon, R.; Colombo, M.; Nisensohn, L.; Pire, E.; Postma, J. (1980). Descripción de Vegetación y Suelos del Norte de la Provincia de Santa Fe.
- Bissio, J.; Luisoni, L.; Battista, W. (1990). Relación entre el Agua Superficial y los Principales Tipos de Vegetación de los Bajos Sub-meridionales de Santa Fe. Reconquista, Santa Fe: Publicación Técnica N° 5.
- Bojanich, E.; Risiga, A. (1981). Aguas Subterráneas de la Provincia de Santa Fe. En *Estudios de Geografía de la Provincia de Santa Fe*. Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. Tomo 9.
- Cap-Net. (2005). Red Internacional para el Desarrollo de Capacidades en la Gestión Integrada del Recurso. Planes de gestión integrada del recurso hídrico. Manual de capacitación y guía operacional.
- Cap-Net; PNUD. (2008). Gestión Integrada de los Recursos Hídricos para Organizaciones de Cuencas. Red Internacional de Desarrollo de Capacidades para la GIRH.
- CEPAL. (2016). Perspectivas económicas de América Latina 2016. Hacia una nueva asociación con China. Paris: OECD Publishing.
- COHIFE. (2003). Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina. Fundamentos del Acuerdo Federal del Agua.
- FAO. (2013). Captación y Almacenamiento de Agua de Lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, Chile.
- FVSA; FUNDAPAZ. (2007). Bajos Submeridionales. Experiencia piloto de manejo del agua y recursos asociados.
- FVSA; FUNDAPAZ; ECODES. (2010). Proyecto: "Manejo Ecológico - Productivo del Humedal de los Bajos Submeridionales", Provincia de Santa Fe, Argentina.
- García Vargas, M. (2014). De la apropiación de la tecnología a la gestión del conocimiento. Retos de la gestión comunitaria del agua y el saneamiento. En S. M. Romero Pérez R., *Los retos de la adopción tecnológica en el sector hídrico de Latinoamérica* (pág. 245). México.
- Giraut, M.; Laboranti, C.; Rey, C. (2001). Cuenca propia de los Bajos Submeridionales. Creación de una unidad hídrica independiente.

- Indij, D.; Paris, M.; Schreider, M. (2014). Herramientas para contribuir a la gestión sustentable del agua en Latinoamérica. JRC Scientific and Technical Reports. European Commission Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability Luxembourg. Office of the European Union.
- López Calderón, A.; Passalía, C.; Periche, S. (2011). Bases para una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos con Criterios de Sustentabilidad Productiva en la Región de Los Bajos Submeridionales (Pcia de Santa Fe) con Énfasis en los Aspectos Institucionales y Jurídicos. Santa Fe, Santa Fe, Argentina.
- Morras, H.; Candiotti, L. (1981). Relación entre la permeabilidad, ciertos caracteres analíticos y situación topográfica en algunos suelos de los bajos submeridionales (Santa Fe).
- OCDE; CEPAL; CAF. (2015). Perspectivas económicas de América Latina 2016: Hacia una nueva asociación con China. Paris: OECD Publishing.
- OMS; UNICEF. (2015). Progresos en materia de saneamiento y agua potable: Informe de actualización y evaluación del ODM. Nueva York.
- Paris, M. (2013). Notas de clase del curso Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) perteneciente a la Maestría en GIRH. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- Sánchez, L. (2019). Lineamientos de gestión para el abastecimiento sostenible de agua segura en pequeñas localidades del centro norte de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Tesis de Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. 201 pp. Inédita.
- Seminario Taller. (Diciembre de 2013). Los retos de la adopción tecnológica en el sector hídrico en Latinoamérica. 11 a 23 y 112 a 125. México.
- Soares, D.; Fonseca, O. (2014). Lecciones aprendidas en la promoción de tecnologías domésticas en Chiapas, México. En S. M. Romero Pérez R., Los retos de la adopción tecnológica en el sector hídrico de Latinoamérica (pág. 245). México.
- Solsona, F.; Mendéz, J. (2002). Desinfección del Agua. Lima, Perú.
- Sosa, D. (2012). El Agua, Excesos y Déficits en la Producción Agrícola de Secano y Pecuaria dentro de la Cuenca Inferior del Río Salado. La Coruña, España.
- Taller. (Noviembre de 2015). Adopción tecnológica de Agua y Saneamiento". Del fortalecimiento de organizaciones locales en políticas públicas. Las dos caras de los procesos de adopción de agua y saneamiento. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Urquidí, J.; Barragán, B.; Camacho, A. (2004). Manual de Capacitación en Operación y Mantenimiento de Tecnologías Alternativas en Agua y Saneamiento. 36 a 42 y 107 a 126. La Paz, Bolivia: 1º Edición.
- WWAP. (2016). Water and Jobs. Paris: UNESCO.

Como citar este artículo:

Sánchez, L., et al., (2020). Estrategias de gestión para el abastecimiento sostenible de agua segura a pequeñas comunidades del noroeste de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 120-135. doi: 10.29104/phi-aqualac/



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

SUSCRIPCIONES

Si desea recibir la revista Aqua-LAC en forma
periódica en formato digital envíe un correo electrónico a:

aqualac@unesco.org
aqualac@uaq.mx

SUSCRIPTIONS

*If you would like to periodically receive Aqua-LAC
journal in digital format send an email to:*

*aqualac@unesco.org
aqualac@uaq.mx*

<http://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC>



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



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

70
1949 - 2019

Oficina de Montevideo

Oficina Regional de Ciencias
para América Latina y el Caribe

UNESCO

Programa Hidrológico Intergubernamental
Oficina Regional de Ciencias
para América Latina y el Caribe

*Intergovernmental Hydrological Programme
Regional Office for Science
for Latin America and the Caribbean*

Revista científica del Programa Hidrológico Intergubernamental
en América Latina y el Caribe (PHI-LAC)
ISSN: 1688-2873

Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe
UNESCO. Edificio Mercosur. Luis P. Piera 1992, 2º piso
11200 Montevideo, Uruguay
aqualac@unesco.org

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

<http://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC>

Aqua-LAC

10
años

Revista del Programa Hidrológico Internacional
para América Latina y el Caribe