



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

United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Programa Hidrológico Internacional
International Hydrological Programme

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

2

VOL. 10
SEPT 2018

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

CONSEJO EDITORIAL

- Eric Alfaro - Clima
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
- Patricia Avila - Ciencias Sociales / Antropología Social
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Walter Baethgen - Agua y Agricultura
International Research Institute
for Climate and Society, USA
- Gino Cassasa - Glaciología
Centro de Estudios Científicos, Chile
- Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos
Universidade de Brasília, Brasil
- José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica
Universidad Simón Bolívar, Venezuela
- Evens Emmanuel - Calidad de Aguas
University of Quisqueya, Haiti
- Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación
National Center for Atmospheric Research, USA
- Alfonso Gutierrez - Hidrología de Superficie
Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Lilián Laborde - Legislación
Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Michael McClain - Ecohidrología
IHE Delft, Países Bajos
- Miguel Mariño - Aguas Subterráneas
University of California Davis, USA
- Poliopro Martínez Austria - Ingeniería Hidráulica
Universidad de las Américas Puebla, México
- Victor Pochat - Gestión Integrada
Instituto Argentino de Recursos Hídricos, Argentina
- Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS
Programa de las Naciones Unidas
para el Medio Ambiente

STAFF EDITORIAL / EDITORIAL STAFF

Editor en Jefe / Editor in Chief
Roberto Pizarro

Editor Ejecutivo / Executive Editor
Miguel Doria
UNESCO

Editores Invitados / Guest Editors:

- Poliopro Martínez Austria
Cátedra UNESCO en Riesgos
Hidrometeorológicos
Universidad de las Américas Puebla
- Marta Paris
Cátedra UNESCO Agua y Educación
para el Desarrollo Sostenible
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad Nacional del Litoral

Asistente Editorial / Editorial Assistant
Cynthia Rivera
UNESCO

Diseño Gráfico / Graphic Design
Ser Gráficos

Fotografía de Portada / Cover Design
Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

- Propuesta de creación de una organización de cuenca como pilar de la gestión de los recursos hídricos en un área rural antropizada de Entre Ríos (Argentina)
- Proposal for the creation of a basin organization as a pillar of the management of water resources in an antropized rural area of Entre Ríos (Argentina)..... 1
- Lozeco, Cristóbal; Arbuét, Alejandra; Pusineri, Graciela; Romanatti, Mariana**
- Modelado de dinámica de sequías para predicción de incendios forestales en el estado de Morelos, México
- Mathematical modeling of drought dynamics for prediction of wildfires in the sate of Morelos, Mexico..... 13
- Vilchis Francés, A.Y.; Díaz-Delgado, C.; Gómez Albores, M.A.; Bâ, K.M.; Becerril Piña, R.; Mastachi Loza, C. A.**
- Seawater Desalination, the solution for drinking water augmentation in Aruba for more than 85 years: A historical overview
- Desalinización de agua de mar, la solución para el aumento de agua potable en Aruba desde hace más de 85 años: Un panorama histórico 22
- Marchena, Filomeno A.; Halman, Johannes I. M.**
- Calidad de agua subterránea en el sector centro occidental del Municipio Miranda (estado Zulia, Venezuela)
- Groundwater's quality in west central sector of Miranda Municipality (Zulia state, Venezuela)..... 38
- Gutiérrez, Janet, Marín, Julio, Paris, Marta**
- Modelación hidrológica hidráulica con información de actores sociales en la cuenca del arroyo las turbias. Santa Fe. Argentina
- Hydrological hydraulic modeling with information from social actors in the arroyo las turbias basin. SantaFe. Argentina 46
- Morresi, M.; Marcus, R.; Gardiol, M. y Biancotti, E.**
- Zonificación del sistema acuífero guaraní en Uruguay: una guía orientativa para su gestión y protección ambiental
- Zoning of the guaraní aquifer system in Uruguay: a suggested guide for its environmental management and protection..... 61
- Veroslavsky, Gerardo; Manganelli, Alberto**
- Decision making under future climate uncertainty: Analysis of the hydropower sector in the Magdalena River Basin, Colombia
- Toma de decisiones bajo incertidumbre de un clima futuro: Análisis del sector hidroenergético en la cuenca del río Magdalena, Colombia..... 81
- Gómez-Dueñas, Santiago; Gilroy, Kristin, Gersonius, Berry, McClain, Michael**
- Sistema de Monitoreo Hidrológico en Tiempo Real para el Paraguay
- Centro Internacional de Hidroinformática. Itaipu-UNESCO, Paraguay 93
- Vera, Santiago; Vázquez, Daniel**
- Elaboración de una definición regional de gestión integrada de recursos hídricos para América Latina y el Caribe
- Elaboration of a regional definition of integrated water resources management for Latin America and the Caribbean 103
- França Doria, Miguel; Lobo Igartua, Constanza**

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México
Center of Research and Higher in Studies of Social Anthropology (CIESAS), Mexico

JUAN CARLOS BERTONI

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
Nacional University of Córdoba, Argentina

LUCILA CANDELA

Universidad de Cataluña-UPC, Barcelona, España
Technical University of Catalonia-UPC, Barcelona, Spain

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

Instituto Internacional de Florida
Florida International Institute

MIGUEL DORIA

Hidrólogo Regional, PHI-LAC, UNESCO. Ex officio
Regional Hydrologist, IHP-LAC, UNESCO. Ex officio

EVENS EMMANUEL

Université Quisqueya, Haití
University of Quisqueya, Haití

BLANCA JIMÉNEZ

Directora de División Ciencias del Agua, UNESCO
Director of Water Science Division, UNESCO

ALFONSO GUTIÉRREZ

Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ), Universidad Autónoma de Querétaro, México
Water Research Center (CIAQ), University of Queretaro, México

WILL LOGAN

Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWarm), USA
International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWarm), USA

EDUARDO PLANOS

Instituto de Meteorología, Cuba
Meteorological Institute, Cuba

SUSCRIPCIONES

Si desea recibir la revista Aqua – LAC en forma
periódica en formato digital descargue el formulario
de suscripción de nuestro sitio web:

www.unesco.org/uy/phi/aqualac
y envíelo a
aqualac@unesco.org

SUSCRIPTIONS

If you would like to periodically receive Aqua – LAC
journal in digital format download the suscription
form from our website:

www.unesco.org/uy/phi/aqualac
and send it to
aqualac@unesco.org

EDITORIAL

El Programa Hidrológico Internacional para la América Latina y el Caribe (PHI-UNESCO), a través de su familia del agua en la cual se incluyen las cátedras y centros bajo auspicios de UNESCO, tiene prestado una enorme e importante contribución en favor de la preservación y de la conservación de los recursos hídricos, en cantidad y calidad, para la actual y las futuras generaciones.

Desde 2009, la Revista Científica *Aqua-LAC* es un ejemplo de excelencia en la prestación de servicios de calidad para la sociedad y a los encargados de la toma de decisión, proporcionándonos la divulgación de importantes resultados multidisciplinarios derivados de complejas investigaciones científicas desarrolladas por especialistas de varias naciones y áreas de actuación.

Entre la versátil diversidad de temas tratados, se distingue el incentivo al uso de tecnologías innovadoras y una gestión integrada y adecuada de estos recursos, tan esenciales para nuestra existencia, además de la aclaración, siempre prudente, sobre aspectos legales, y la búsqueda por alternativas que proponen garantizar la seguridad hídrica.

En este contexto, el presente ejemplar de la *Aqua-LAC*, editado por el Centro Internacional de Hidroinformática (CIH), nos lleva hacia un verdadero viaje por la integración "latinoamericana y caribeña de las aguas" por medio de artículos científicos producidos por especialistas y basados en actividades esenciales desarrolladas y/o promovidas en nuestros territorios.

Uno de los temas retratados – y que debe ganar cada vez más espacio – remite a la importancia del Acuífero Guaraní, el mayor acuífero transfronterizo del mundo con sus aguas distribuidas por una población de más de 90 millones de personas, formadas por argentinos, brasileños, paraguayos y uruguayos. Existe una gran necesidad de entender como esos recursos pueden ser explotados de manera sostenible, incluso para no perjudicar la calidad de vida y la supervivencia de nuestros nietos.

Los otros temas tratados en este número incluyen diversas temáticas en la materia como la gestión de recursos hídricos, modelación de sequías, desalinización de agua de mar y calidad de aguas subterráneas. Actualmente, el agua está distribuido de forma heterogénea en el mundo, alternando entre el desperdicio y la escasez en pequeñas distancias. Las consecuencias de este desequilibrio pueden ser catastróficas, con la ocurrencia de acontecimientos extremos como inundaciones, sequía y huracanes que, por su vez, causan muertes y daños ambientales y económicos. Esa situación todavía no es más grave debido a la existencia de programas y proyectos de gestión de riesgos.

En el Centro Internacional de Hidroinformática, vivenciamos, en la práctica, un gran ejemplo de como la tecnología puede ayudar en este proceso de gestión del territorio. La Plataforma de Informaciones Geográficas del CIH facilita el acceso a informaciones geográficas entre colaboradores y otras partes interesadas en la gestión de los recursos hídricos en el área de influencia de la Itaipu Binacional y de la Cuenca del Plata. La plataforma tiene niveles distribuidos en 14 categorías: agricultura y ganadería, agua, medio ambiente, biota, registro, cobertura del suelo, economía, elevación, estructura, geo ciencia, límites, localización, sociedad y transporte. Esta herramienta permite desplegar la infraestructura de datos especiales utilizando una interfaz amigable y moderna a través de la Internet. Todo eso utilizando *software* libre de código abierto, característica esencial para la replicabilidad en otros locales. Es la democratización del acceso a las informaciones que pueden ayudarnos a tener un futuro más sostenible.

Nuestras votaciones para que este ejemplar tenga una amplia difusión entre investigadores y la sociedad en general.

Nara Nami Gazzola

Gestora del Centro Internacional de Hidroinformática– Parque Tecnológico Itaipu – Brasil

Editorial (ENGLISH)

The International Hydrological Programme of UNESCO for Latin America and the Caribbean (IHP-LAC) and the UNESCO water family, which includes the chairs and centers under the auspices of UNESCO, have provided an important contribution for the preservation and the conservation of water resources, both in quantity and quality, for the current and future generations.

Since 2009, the *Aqua-LAC* Scientific Journal is an example of excellence in the provision of knowledge and quality information for experts and decision-makers, providing the dissemination of important multidisciplinary results, derived from complex scientific research developed by specialists from various nations and areas of action.

Among the diversity of water related topics, there is an incentive to use innovative technologies and an integrated and adequate management of these resources, which are essential for our existence, as well as the important clarification about legal aspects and the search for alternatives to guarantee water security.

In this context, this number of *Aqua-LAC*, edited by the International Hydroinformatics Center (CIH), takes us on a journey through the "Latin American and Caribbean water integration" through scientific articles produced by specialists and based on essential activities developed and/or promoted in our region.

One of the subjects portrayed, refers to the importance of the Guaraní Aquifer, the largest transboundary aquifer in the world with its waters distributed by a population of more than 90 million people, in Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay. There is a great need to understand how these resources can be used and managed in a sustainable manner, so as not to negatively impact quality of life and the survival of the future generations.

The other articles covered in this issue focus on water resources management, drought modeling, seawater desalination and groundwater quality. Water is heterogeneously distributed worldwide, alternating in small distances between waste and scarcity. The consequences of this imbalance can be catastrophic, with the occurrence of extreme events such as floods, droughts and hurricanes that, often cause deaths, environmental and economic damage. This situation would be dangerous if it were not for the current risk management programs and projects.

At the International Hydroinformatics Center, we experience in practice a great example of how technology can help territorial management. The CIH Geographic Information Platform facilitates access to geographic information among collaborators and other interested parties in the management of water resources in the area of influence of Itaipu Binacional and the River Plate Basin. The platform has 14 categories: agriculture and livestock, water, environment, biota, registration, land cover, economy, elevation, structure, geo-science, limits, location, society and transport. This tool allows the deploy of special data infrastructure using a friendly and modern interface through the Internet. It is free open source software, an essential feature for replicability in other locations. The democratization of access to information provides a relevant contribution towards a more sustainable future.

For these purposes, we wish this issue has a wide dissemination among researchers and society in general.

Nara Nami Gazzola

Gestora del Centro Internacional de Hidroinformática– Parque Tecnológico Itaipu – Brasil

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación: La Revista Aqua-LAC será publicada cada seis meses o dos veces al año.

Contenido: La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinaria que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social. El contenido de la publicación buscará abarcar las necesidades de la comunidad científica, gestores de los recursos hídricos, tomadores de decisiones y el público en general.

Idioma: La publicación Aqua-LAC aceptará manuscritos en inglés y español, y publicará el resumen en el idioma original del texto y un resumen en el otro idioma oficial de la revista.

Referencias Bibliográficas: Artículo: Autor. Año. Título. Revista volumen: páginas.

Libro: Autor. Año. Título. Editorial, Ciudad, Estado o Provincia. Páginas. Si la ciudad es poco conocida internacionalmente, mencione el país.

Informe o memoria de Congreso: Autor. Año. Título. Institución organizadora o editorial en forma breve, Ciudad, Estado o Provincia. Páginas. Si la ciudad es poco conocida internacionalmente, mencione el país.

Capítulo de Libro: Autor. Año. Título del capítulo, páginas del capítulo. En Editor (ed.). Título. Editorial. Ciudad, Estado o Provincia.)

Tesis: Autor. Año. Título. Tipo de Tesis, Universidad, Ciudad, Estado o Provincia. Si la ciudad es poco conocida internacionalmente, mencione el país.

Informes y trabajos inéditos: Autor, año y ubicación de dicho trabajo. Páginas web: Título de la página, autor, organismo o institución editora. Lugar de origen del servidor, fecha de acceso a la información. Dirección electrónica, correo electrónico de contacto.

Nota: Si su artículo es en español, use los nombres oficiales de las ciudades en este idioma.

Aceptación de los manuscritos: Los manuscritos sometidos para publicación deberán ser originales, no habiéndose sometido con anterioridad para su publicación en otros medios, y serán sometidos a un proceso de revisión y dictamen previos a su aceptación. Artículos invitados, o artículos en ediciones temáticas especiales, no necesariamente serán sometidos a revisión.

El Editor en Jefe, en consulta con el Consejo Directivo, se reserva el derecho de rechazar un manuscrito si se considera que su contenido en fondo y/o forma no se ajusta a la línea editorial de la revista Aqua-LAC.

Proceso de revisión: Todos los manuscritos sometidos a publicación serán revisados por al menos dos revisores calificados, no necesariamente miembros del Comité Editorial.

Este proceso se lleva a cabo a través de la metodología de pares ciegos o "double-blind review", en el que se mantiene el anonimato de los autores para los revisores al momento de corregir y se mantiene el anonimato de los revisores en todo momento, incluso después de la publicación.

Un manuscrito puede ser aceptado, aceptado con condiciones, o rechazado con la debida justificación en todos los casos. En el caso de que haya comentarios, el manuscrito será devuelto al (a los) autor(es) para que respondan a los mismos. El (Los) autor(es) tendrán 60 días para devolver el manuscrito modificado al Editor en Jefe, claramente indicando los cambios realizados o enviando una declaración escrita solidamente fundamentada del motivo por el cual no han acogido los comentarios de los revisores.

Derechos de reproducción (Copyrights): Los autores de artículos aceptados para ser publicados, aceptarán de manera automática que los derechos de autor se transferirán a la revista.

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

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication: The journal Aqua-LAC will be published every six months or twice a year.

Contents: The journal Aqua-LAC contains scientific, policy-related, legislative, educational, social, and communication articles and revisions related to water sciences and water resources topics. The content of the journal is aimed to meet the requirement of the scientific community, water resources managers, decision-makers, and the public in general.

Languages: The journal Aqua-LAC accepts manuscripts in English or Spanish and publishes abstracts in both languages.

Bibliographic References: Article: Author. Year. Title. Magazine, Volume, Pages.

Book: Author. Year. Title. Editorial, City, State or Province. Pages. (If the city is little known internationally please mention country.)

Report or document of a Meeting: Author. Year. Title. Organizer institution or brief name of editorial. City, state or province. Pages. If the city is little known internationally please mention country.

Book chapter: Author. Year. Chapter title. "In Editor (ed.)" Title. Editorial. City, State or Province.

Thesis: Author. Year. Title. Type of thesis. University. City, State or Province. If the city is little known internationally please mention country.

Reports and unpublished documents: Author, year and location of the document.

Web page: Title of the page. Author. Editor institution or organization. Place of the server. Date of access to the information. Web address, contact email.

Acceptance of manuscripts: Manuscripts submitted for publication must be originals that have not been submitted for possible publication elsewhere. Submitted manuscripts will be undergoing a review process. Invited articles or articles in special topical editions, will not necessarily be submitted to review.

The Editor in Chief, in consultation with the Board of Directors, reserves the right to reject a manuscript if its contents is deemed substantially or formally inconsistent with the editorial line of AQUA-LAC magazine.

Review process: All manuscripts submitted for publication will be reviewed by at least two qualified reviewers, not necessarily members of the Editorial Committee.

This process is made as a double-blind review, in which the anonymity of the authors is respected at the time of revision and the anonymity of the reviewers is held throughout the process and even after the publication.

A manuscript can be accepted with or without comments or it can be rejected with due justification. In the first case, the manuscript will be returned to the author(s) for him/her/them to address the comments. The author(s) will have 60 days to return the modified manuscript to the Editor in Chief, clearly indicating the changes made or providing a written statement with solid fundaments for not addressing comments by the reviewers.

Copyrights: The authors of accepted papers automatically agree the author rights to be transferred to the Journal. The author(s) are expected to sign a copyright form available in the Aqua-LAC webpage.

Disclaimer: 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".

**PROPUESTA DE CREACIÓN DE UNA ORGANIZACIÓN DE CUENCA
COMO PILAR DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
EN UN ÁREA RURAL ANTROPIZADA DE ENTRE RÍOS (ARGENTINA)**

**PROPOSAL FOR THE CREATION OF A BASIN ORGANIZATION
AS A PILLAR OF THE MANAGEMENT OF WATER RESOURCES
IN AN ANTROPIZED RURAL AREA OF ENTRE RÍOS (ARGENTINA)**

Lozeco, Cristóbal¹; Arbuét, Alejandra; Pusineri, Graciela; Romanatti, Mariana

Resumen

Las características de la cuenca del Arroyo Sauce Grande, próxima a la capital de la provincia de Entre Ríos (fuertes pendientes, suelos con elevados tenores de arcilla, lluvias intensas) y los problemas ambientales identificados (descargas no tratadas de efluentes industriales y agropecuarios; erosión de suelos; pérdida de bosque nativo; presión antrópica provocada por el avance actual y futuro de la urbanización) reflejan la importancia de abordar estas problemáticas naturales y antrópicas con una visión integrada. Además, evidencian la necesidad de contar con una organización de cuenca que nucleee a todos sus actores como un ámbito para el abordaje de dichos problemas.

En este trabajo (realizado en el marco de un Proyecto de Extensión de Interés Social de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina) se presentan los principales resultados alcanzados a partir de promover el proceso de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) como catalizador para la implementación de políticas públicas y acciones (obras y medidas no estructurales) tendientes a mejorar la calidad de vida de los habitantes de la cuenca.

Durante dos años se desarrollaron talleres participativos y entrevistas, con el objeto de validar los problemas hidrológicos y ambientales identificados y a la vez realizar un mapeo de los distintos actores (sociales, productivos, gubernamentales, no gubernamentales) y un análisis de la legislación provincial vigente. A partir de ello, se elaboró una propuesta para la creación de una organización de cuenca para la gestión de los recursos hídricos y se diseñaron programas educativos y comunicacionales.

Palabras clave: Gobernanza, GIRH, organización de cuenca.

Abstract

To achieve a governance based on social participation is key to sustaining governability and promoting water security in the territory.

The characteristics of the Arroyo Sauce Grande basin, near to the capital of the province of Entre Ríos (strong slopes, soils with high clay tenors, intense rains) and identified environmental problems (untreated discharges of industrial and agricultural effluents, soil erosion; loss of native forest; anthropic pressure caused by the current and future development of urbanization) reflect the importance of addressing these issues with an integrated vision. They also demonstrate the need for a basin organization that joint all of its stakeholders as an framework for solving those problems.

This paper (carried out within the framework of a Social Interest Extension Project of the National University of the Litoral, Santa Fe, Argentina), presents the main results obtained from promoting the process of integrated water resources management (IWRM) as a catalyst for the implementation of public policies and actions (works and non-structural measures) to improve the quality of life of the inhabitants of the basin.

During two years participatory workshops and interviews were held to validate the hydrological and environmental problems identified and to do the mapping of the different actors (social, productive, governmental and non-governmental) and an analysis of the current provincial legislation. Based on this, educational and communication programs were designed, and a proposal was made for the creation of a basin organization for water management.

Keywords: Governance, IWRM, basin organization.

1 Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral Ciudad Universitaria, Ruta Nac. 168 Km 472 - Santa Fe (CP3000) – Argentina, 0054-342-4557034, E-mail: clozeco@fich.unl.edu.ar

1. INTRODUCCION

Los recursos naturales en la Provincia de Entre Ríos han sido sometidos en las últimas décadas a procesos de degradación como producto de la acción antrópica. La cuenca del Arroyo Sauce Grande, afluente del Arroyo Las Conchas, ubicada en el Departamento Paraná (Figura 1), no escapa a esta situación general. Posee una superficie de 15000 ha. La actividad productiva más destacada es la

agropecuaria y cuenta también con industrias, tales como frigoríficos y tambos. En la cuenca hay cinco pequeñas localidades que suman aproximadamente 3000 habitantes: Sauce Montrull, Aldea María Luisa, Sauce Pinto, Villa Fontana y Gobernador Etchevehere (Las Delicias). Existen escuelas primarias y secundarias, y dos escuelas agrotécnicas de educación media (Las Delicias y Normal Rural Almafuerte) y una reserva natural (Parque Berduc).

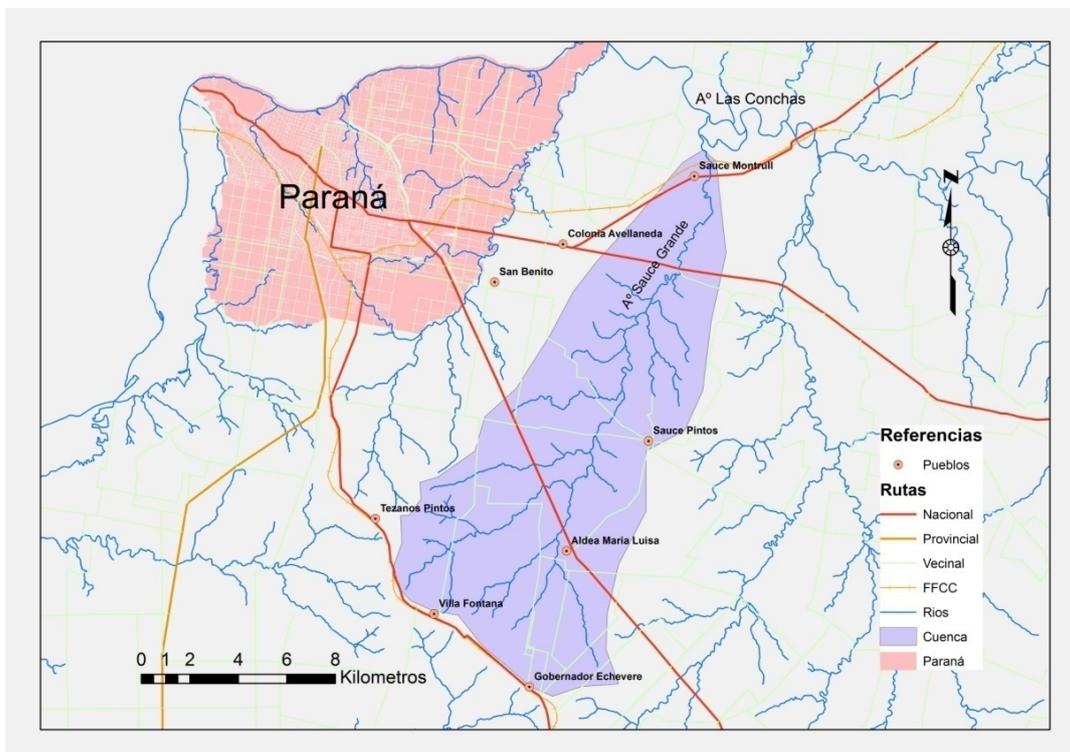


Figura 1. Cuenca del Arroyo Sauce Grande

Esta cuenca tiene varias fuentes de contaminación del agua que la ponen en riesgo, tales como, el sobreuso de químicos en la producción agrícola, efluentes provenientes de establecimientos pecuarios (avicultura, cría de ganado ovino, bovino, porcino, caprino y feedlots), industriales (frigoríficos y tambos) y, en algunos casos, domésticos y urbanos. En el contexto de la cuenca, existen problemas hídricos y ambientales que merecen ser abordados con una visión integral:

- Inundaciones provocadas por precipitaciones intensas y por las características del relieve y de los suelos de la cuenca, principalmente vertisoles (con elevados tenores de arcillas). Las elevadas pendientes provocan una rápida respuesta de la cuenca ante estas precipitaciones, anegando parcelas cultivadas, establecimientos agropecuarios y zonas urbanas y suburbanas. Las crecidas de los arroyos también afectan caminos rurales y rutas provinciales, y sus puentes y alcantarillas.

- Deterioro de la calidad del agua, principalmente provocados por los efluentes de las actividades industriales y agropecuarias desarrolladas en la cuenca.
- Erosión de suelos en algunos sectores de la cuenca.
- Pérdida del bosque nativo en vastos sectores de la cuenca.
- Presión antrópica hacia la zona de la desembocadura del Arroyo Sauce Grande, en las proximidades de la Ruta Nacional N° 12, provocada por el avance actual y futuro de la ciudad de Paraná.
- Problemas de gobernabilidad por ausencia de procesos participativos que fortalezcan y definan esquemas de gobernanza del agua en la cuenca.

Las características de la cuenca y los problemas identificados reflejan la importancia de contar con una visión integrada para la gestión de los recursos hídricos y otros recursos naturales asociados.

Es sabido que la cuenca constituye la unidad territorial para la planificación y gestión coordinada de los recursos hídricos. La provincia de Entre Ríos cuenta con la Ley de Cuencas N° 9757/2007, que tiene por objetivo la creación, regulación, conformación y funcionamiento de los Comités de Cuencas y los Consorcios del Agua de la provincia, con la finalidad de generar condiciones para asegurar la explotación racional y el uso sustentable del agua de dominio público.

En este contexto, los destinatarios de este proyecto (Proyecto de Extensión de Interés Social de la Universidad Nacional del Litoral - Convocatoria 2014 - "Gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del arroyo Sauce Grande, Provincia de Entre Ríos. Propuesta de creación de una organización de cuenca con participación de distintos actores sociales") fueron los habitantes de la cuenca (productores, industriales y vecinos) y los gestores provinciales, en particular los agentes de la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos. Además de los habitantes de las localidades mencionadas y de la población rural, también se involucraron en el proyecto las dos escuelas agrotécnicas y el Parque Berduc.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación desarrollada en el marco del proyecto fue promover la GIRH en la cuenca del Arroyo Sauce Grande. Para ello se definieron como objetivos específicos:

- Brindar lineamientos para la creación de una organización de cuenca que nucleee a todos los actores de la cuenca, como un ámbito para el abordaje de los problemas detectados.
- Identificar las obras necesarias para contribuir a la solución de los problemas detectados en la cuenca, en el marco de un plan de gestión participativa.
- Identificar medidas no estructurales que contribuyan a la solución de los problemas detectados, en forma coordinada con programas provinciales existentes.
- Diseñar programas comunicacionales y educativos, que contribuyan a la apropiación del proyecto por parte de los actores de la cuenca.

3. MARCO CONCEPTUAL

Dado que el proyecto se orienta a la formulación de un esquema de organización de cuenca con participación de distintos actores sociales bajo los principios de la GIRH, resulta de interés señalar algunos aspectos conceptuales en los que se enmarcan las ideas sobre las que se apoyó el trabajo desarrollado.

La GIRH puede ser definida de diversas maneras. Así, GWP (2000) expresa, en la que quizás constituye la

definición más difundida, que la GIRH es un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.

En tanto Cap Net (2008) conceptualiza a la GIRH como un proceso sistemático para el desarrollo sostenible, la asignación y el control del uso de los recursos hídricos en el contexto de objetivos sociales, económicos y ambientales. Este enfoque contrasta con el enfoque sectorial, que es aplicado aún hoy en varios países, en los cuales, por ejemplo, la responsabilidad de la gestión del agua potable recae en una agencia, la del agua de irrigación en otra y la del agua para el ambiente en otra. En estos casos, la falta de relaciones intersectoriales conduce a una gestión no coordinada de los recursos hídricos, lo cual provoca conflictos y atenta contra la sostenibilidad de los sistemas.

Por otra parte, el avance de la urbanización en el mundo es cada vez más notable. Hay que atender a esta realidad e interactuar con los sistemas de ciudades, incorporando visiones de mediano plazo, atendiendo a la migración interurbana, sobre todo hacia ciudades medias que demandarán servicios de agua y ejercerán presión sobre los recursos hídricos y el ambiente en general y hacia las zonas metropolitanas, con una complejidad aún mayor. Esta dimensión espacial constituye el primer pilar sobre el que se asienta el diseño del marco institucional de la GIRH.

El segundo pilar de la GIRH es la descentralización. La creación por ley de diversos órganos decisivos y consultivos en materia de agua es la concreción de este principio. El diseño institucional tiene que ser el adecuado y orientado a una efectiva descentralización y participación de los actores relevantes en la toma de las decisiones.

El tercero de los pilares sobre el que sostiene la GIRH es la participación social en la toma de decisiones, en la conformación de las políticas públicas y en la asignación de los usos y derechos de agua. Son numerosos los conflictos sociales en busca de espacios de deliberación sobre el agua. Las poblaciones muchas veces sufren las decisiones verticales que sobre el agua se adoptan y en las cuales no se las ha tenido en cuenta.

Por último, un pilar que contribuye a la consolidación de la GIRH es la incorporación de todos los puntos de vista, especialmente los de los actores más vulnerables, quienes paradójicamente son los más afectados y los que menos poder y capacidad de decisión tienen.

Según Torregrosa Martí (2007), entre los principios generalmente aceptados en la GIRH se pueden destacar los siguientes:

- la unidad de gestión de recursos es la cuenca hidrográfica y por tanto la GIRH debe ser aplicada en ese ámbito.
- la GIRH debe seguir un enfoque de sistemas. Este debe reconocer los componentes individuales, las relaciones entre ellos y no obviar el hecho de que una alteración en uno de los elementos del sistema indudablemente afectará a otras partes del mismo.
- participación de todos los usuarios implicados.
- reconocimiento de la dimensión social de la gestión del agua.
- disponibilidad de información y capacidad de usarla.
- financiación confiable y sostenible, que asegure una recuperación de los costos combinándola

con la aplicación de subsidios que garanticen solidaridad y equidad.

- equidad en la asignación de recursos.
- reconocimiento del agua como bien económico.
- apoyo gubernamental.
- balance entre los valores sociales, económicos y ambientales.

Son supuestos básicos de la GIRH (GWP, 2000) lograr una adecuada consideración de las dimensiones social, ambiental y económica, atendiendo a la sustentabilidad de los recursos hídricos. En el contexto de la Figura 2 debe entenderse a estas dimensiones como metas a alcanzar. Por su parte, los instrumentos de gestión, el ambiente propicio y los roles institucionales constituyen componentes esenciales para el logro de dichas metas.

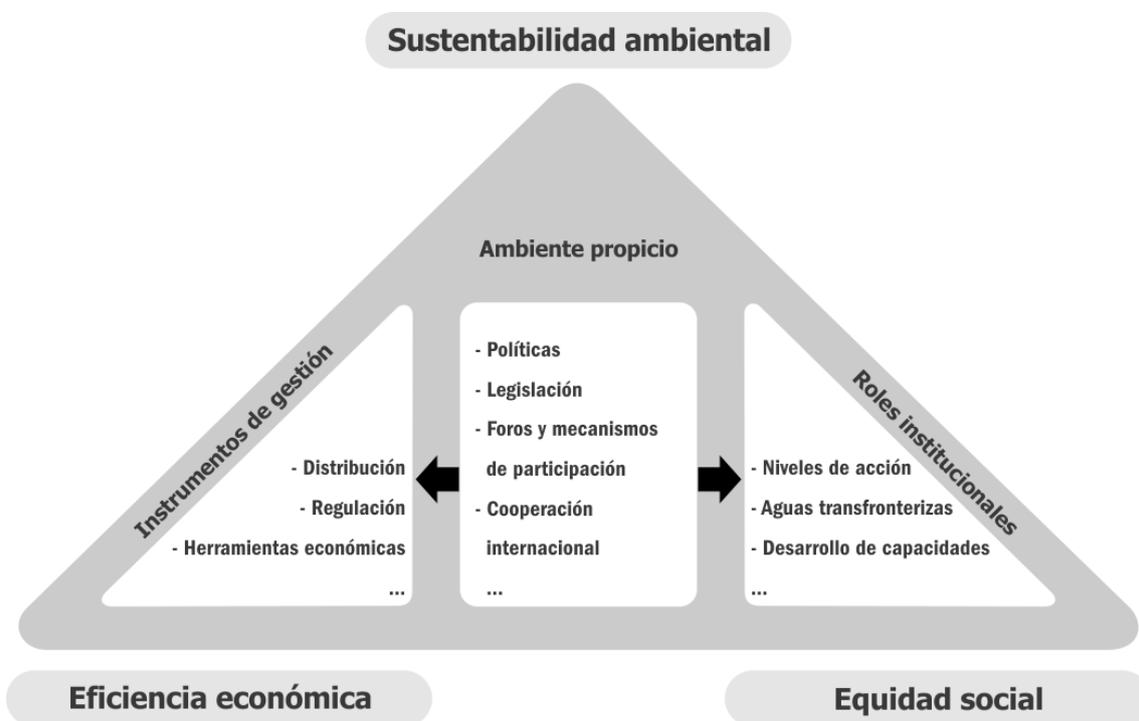


Figura 2. Marco general para la GIRH (tomada de GWP, 2000)

En definitiva, los tres elementos clave que garantizan la aplicabilidad de la GIRH pasan por la existencia de un ambiente propicio formado por políticas, legislación y estrategias apropiadas para el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos; un marco institucional adecuado, a través del cual las políticas, las estrategias y la legislación puedan ser implementadas, y unos instrumentos de gestión prácticos, que permitan a esas instituciones hacer su trabajo - (Jonch-Clausen -2004, citado por Torregrosa Martí 2007).

4. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ACTORES CLAVE

La identificación y valoración de los actores clave que intervienen en las problemáticas objeto de este proyecto es una instancia fundamental, de cara a la implementación de programas y proyectos de cualquier tipo, y en particular en el caso de programas y proyectos que apunten a la GIRH en una cuenca, ciudad o región determinadas. Para ello es necesario identificar los procesos en los cuales se puede construir y proveer las bases y estrategias

para la participación en el manejo integrado de cuencas (Rietbergen-Mc Cracken y Narayan, 1998). Se denomina actor o interesado (del término stakeholder en inglés) a aquellas personas que “ganan o pierden” algo como resultado de un proyecto o política de intervención, o son capaces de influir sobre los resultados de esa intervención.

En la problemática objeto de este proyecto, la identificación de los actores clave se hizo desde dos dimensiones. La primera de ellas corresponde a la esfera de acción o proceso relevante del que participan los “interesados”, en el marco de la estructura de organización de la sociedad (Urrutia, 2004). La segunda corresponde al enfoque de influencia (Análisis social) que los distintos actores tienen sobre el proyecto o la política de intervención considerados (Chevalier y Buckles, 2009).

4.1. Enfoque desde la esfera de acción de los actores

Las esferas de acción o procesos relevantes habitualmente se clasifican en económicos, sociales, culturales, ambientales y político-institucionales. Esta clasificación conduce a la identificación de

los actores clave de cada uno de estos procesos y permite analizar cómo estos procesos y sus actores deben incidir en la formulación de programas y proyectos que apunten a la GIRH, como en el caso de la cuenca del Arroyo Sauce Grande.

En este caso la identificación de los actores clave, al igual que la detección de los problemas ambientales e hídricos de la cuenca, se hizo a través de talleres y entrevistas realizadas en distintos lugares y momentos durante la ejecución del proyecto. Se realizaron cuatro talleres, a los cuales asistieron entre 30 y 50 personas, y se realizaron aproximadamente 10 entrevistas a productores e industriales calificados, que por distintos motivos no asistieron a los talleres.

Los talleres se realizaron en lugares caracterizados de las localidades de la cuenca, tales como Juntas Vecinales y Cooperativas de Agua Potable. Para ello se desarrolló un plan de comunicación social para informar y generar conciencia en la población en general y en los actores involucrados en las problemáticas de la cuenca del Arroyo Sauce Grande. Estos talleres también tuvieron como objetivo hacer una validación participativa del diagnóstico preliminar de la cuenca realizado por el equipo de trabajo del proyecto.

Las Figuras 3, 4 y 5 ilustran estos encuentros.

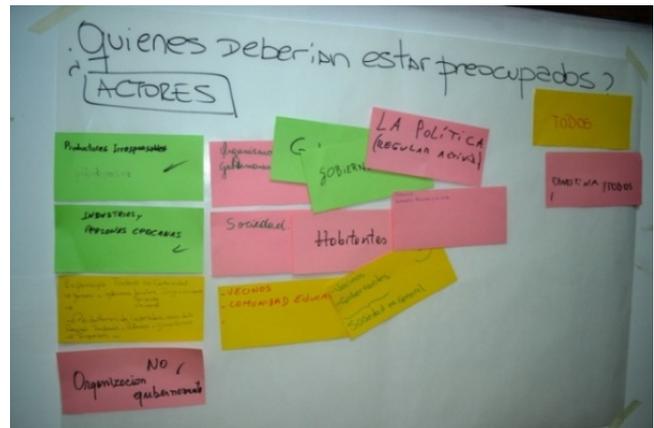


Figura 3. Taller Escuela Agrotécnica Las Delicias – Villa Gobernador Etchevehere



Figura 4. Taller Cooperativa de Agua Potable Aldea María Luisa



Figura 5. Taller Cooperativa de Agua Potable Sauce Montrull

El trabajo llevado a cabo en los talleres permitió sintetizar las esferas principales de acción de los actores involucrados en tres categorías principales: económicos, político - institucionales y sociales. Se consideró que los aspectos ambientales resultan transversales a las restantes categorías y por

ende son parte de cada una de ellas. En la Tabla 1 se señalan los actores identificados en el área de estudio objeto de este proyecto dentro de estas esferas de acción (se destaca que todos los actores indicados en la Tabla 1 participaron en algunos de los talleres realizados).

Tabla 1. Actores clave

Esfera de acción de los actores		
Económica	Político – Institucional	Social
Industriales	Gobiernos locales (Juntas de gobierno)	Vecinos
Productores	Cooperativas de Agua Potable	Escuelas primarias
	Dirección de Hidráulica	Escuelas secundarias
	Ministerio de Planeamiento, Infraestructura y Servicios	Escuelas agrotécnicas
	Secretaría de Ambiente	Centros de promoción de la salud
	Dirección General de Recursos Naturales	ONG
	Dirección de Obras Sanitarias	Cooperativas de viviendas
	INTA Estación Experimental Agropecuaria Paraná	Medios de comunicación
	Parque Escuela Rural “E. Berduc”	
	Universidades	

4.2. Análisis Social de los actores

Para el desarrollo de este enfoque se recurrió al Análisis Social CLIP (colaboración/conflicto, legitimidad, intereses, poder; Chevalier y Buckles, 2009). Esta metodología ayuda a crear los perfiles de los actores involucrados en un problema o acción. Estos perfiles se basan en cuatro factores: poder, intereses, legitimidad y relaciones existentes de colaboración y conflicto. Esta técnica permite describir las características y las relaciones de los principales actores involucrados en una situación concreta y explorar formas de resolver los problemas sociales.

Los principios que rigen el Análisis Social son los siguientes:

- Los actores son las partes cuyos intereses puedan resultar afectados por un problema o acción. También se incluye a aquellos que pueden incidir en un problema o acción utilizando los medios que estén a su disposición, tales como poder, legitimidad y los vínculos existentes de colaboración y conflicto.
- Los intereses (I) son las pérdidas o ganancias que se experimentarán con base en los resultados de las acciones existentes o propuestas. Estas pérdidas y ganancias influyen en el acceso al poder, la legitimidad y las relaciones sociales.
- El poder (P) es la habilidad de influir o incidir en otros y de utilizar los recursos que controla para lograr sus objetivos. Estos recursos incluyen

la riqueza económica, la autoridad política, la habilidad para utilizar la fuerza o amenazar con utilizarla, el acceso a la información y los medios para comunicarse.

- La legitimidad (L) aparece cuando otros actores reconocen por ley o mediante las costumbres locales sus derechos y responsabilidades, y la determinación que se muestra cuando los ejercen.
- Las relaciones sociales abarcan los vínculos existentes de colaboración y conflicto que los afectan en una situación determinada y que se pueden utilizar para incidir en un problema o acción.

En base a estos principios de Análisis Social se establecen las siguientes categorías de actores (desde la más "alta" a la más "baja"): Dominante, Fuerte, Influyente, Respetado, Vulnerable y Marginado. El siguiente Diagrama de Venn (Figura 3) permite comprender el significado de cada una de estas categorías:

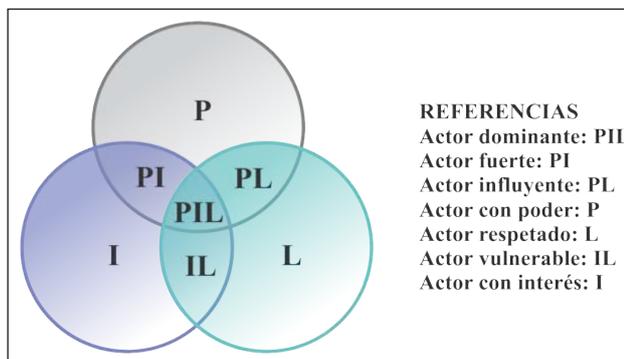


Figura 6. Categorías de actores (adaptado de Chevalier y Buckles, 2009)

A continuación se presenta un encuadre de los actores identificados en la cuenca del A° Sauce Grande en función de las categorías que propone el Análisis Social, para lo cual también se tuvo en cuenta a Lozeco (2013):

Actores dominantes: Se consideran actores dominantes, es decir que reúnen poder, interés y legitimidad (PIL), a los siguientes: Gobiernos locales (Juntas de Gobierno); Dirección de Hidráulica; Dirección General de Recursos Naturales; Ministerio de Planeamiento, Infraestructura y Servicios; Secretaría de Ambiente y Dirección de Obras Sanitarias.

Actores fuertes: Estos actores defienden sus intereses y ejercen el poder del que disponen (PI). También tensionan a los actores dominantes en pos del logro de sus objetivos. En ellos se incluyen a los productores, los industriales y las cooperativas de agua potable (y las asociaciones que los agrupan).

Actores influyentes: Son actores que por su poder y legitimidad (PL) pueden incidir en el problema y

sus eventuales soluciones, más allá de no tener un interés directo en los mismos. Se incluyen en este grupo al Parque Berduc, las escuelas agrotécnicas, al INTA EEA Paraná, las universidades y los medios de comunicación.

Actores respetados: Son actores que poseen legitimidad (L). Se incluyen aquí los centros de promoción de la salud, las escuelas primarias y secundarias, y las ONG.

Actores vulnerables: Caracterizados por sus intereses y legitimidad (IL), se identifican con los actores vulnerables a las asociaciones vecinales de barrios y las cooperativas de viviendas.

A partir de la caracterización efectuada de los actores identificados en las distintas categorías se concluye que:

- los actores dominantes (en especial, las Juntas de Gobierno, la Dirección de Hidráulica y la Dirección General de Recursos Naturales) son imprescindibles en cualquier esquema de organización que se proponga para abordar posibles soluciones a las problemáticas descriptas en este proyecto, reservando para ellos un rol ejecutivo y central en el proceso de toma de decisiones.
- los actores fuertes no pueden dejar de ser contemplados en el esquema de organización a desarrollar, dado que, si bien en muchos casos son los causantes de los problemas ambientales (particularmente los industriales y productores), cuentan con capacidades que adecuadamente orientadas constituyen instrumentos útiles para brindar soluciones a esos mismos problemas.
- los actores influyentes (principalmente el Parque Berduc, el INTA EEA Paraná, las escuelas agrotécnicas y los medios de comunicación) resultan de importancia a la hora de aportar sus capacidades para el desarrollo de conocimientos y para realizar actividades de divulgación y concientización relacionados con las problemáticas descriptas en este proyecto.
- los actores respetados (centros de promoción de la salud, escuelas y ONG) son importantes, pero su inclusión en el esquema de organización que se proponga deberá ser considerada analizando cada caso particular.
- los actores vulnerables (asociaciones vecinales de barrios y cooperativas de viviendas) deben ser debidamente tenidos en cuenta en el esquema de organización que se proponga. El esquema propuesto debe conjugar espacios de decisión ejecutiva, como el señalado para los actores dominantes, con instancias de genuina participación para los actores vulnerables, que validen y legitimen las decisiones que se adopten.

5. POLÍTICAS PÚBLICAS Y LEGISLACIÓN VINCULADAS AL PROYECTO

El proyecto apunta a lograr la construcción de políticas públicas ligadas a la gestión de los recursos hídricos y otros recursos naturales, a través de diferentes organismos provinciales. En particular merece destacarse el rol que representa la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER). Esta Dirección, como una de las principales instituciones de la provincia ligada a la gestión de los recursos hídricos, ha asumido como política de estado los Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina (2003).

En la provincia de Entre Ríos, a partir de la labor de la DHER, se está promoviendo en los últimos años la creación de comités de cuenca y consorcios de riego, de acuerdo a lo estipulado por la Ley 9757/2007. También la provincia posee como política pública un programa de gestión de alerta temprana ante crecidas de los ríos Paraná, Uruguay y Gualeguay. De igual modo, monitorea los recursos hídricos superficiales y subterráneos en cantidad y calidad. También participa del programa "Red de redes hidrometeorológicas", en forma conjunta con el Servicio Meteorológico Nacional, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, la Dirección Nacional de Vialidad, el Instituto Nacional del Agua, la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, la Bolsa de Cereales y la Policía de Entre Ríos, entre otros organismos.

La provincia de Entre Ríos cuenta con las siguientes leyes vinculadas a la temática del proyecto:

Recursos Hídricos

- Ley de Uso Productivo del Agua N° 9172/1998, que regula el uso racional y sustentable de aguas superficiales y subterránea. Decreto N° 7547/99, que reglamenta la Ley 9172.
- Ley de Cuencas N° 9757/2007, que tiene por objetivo regular el funcionamiento de los Comités de Cuenca y los Consorcios del Agua. Los Comités de Cuenca son entidades conformadas por reparticiones públicas (pudiendo incluir Consorcios del Agua) y ONG abocadas a la gestión coordinada y participativa de los recursos hídricos de manera sostenible y racional, en una cuenca. Son personas jurídicas de derecho público con jurisdicción territorial y su financiamiento está dado por fondos del estado provincial. Mientras que los Consorcios del Agua son asociaciones de personas (interesados y representantes de Municipios y Juntas de Gobierno), vinculadas por intereses comunes para el aprovechamiento, ejecución, mantenimiento y administración, sostenible y racional de fuentes de agua o de obras de infraestructura hídrica. Son personas jurídicas de derecho público con jurisdicción territorial (Ej: Consorcios de riego). Su financiamiento está determinado por contribución de los

consorcistas, fondos del estado provincial, subsidios, donaciones, etc.

El ideal, desde el punto de vista de la gestión participativa de los recursos hídricos de una cuenca, sería una combinación de las figuras de Comités de Cuenca y Consorcios de Agua previstos en la Ley N° 9757/2007.

Ambiente

- Decreto N° 2235/2002: establece los valores guías de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos admisibles en el agua potable para consumo humano y de los valores máximos permitidos para el vertido de los efluentes cloacales que se vuelcan a los ríos y arroyos en la Provincia de Entre Ríos.
- Ley N° 10233/2013 "Regulación de la actividad productiva de Engorde Intensivo a Animales de Corral". Esta ley regula la actividad de los establecimientos destinados al engorde intensivo de bovinos a corral o Establecimiento Pecuario de Engorde a Corral (EPEC).
- Ley N° 6260/78 de prevención y control de contaminación por actividades industriales. Decreto N° 5837/91 que reglamenta la Ley N° 6260.
- Ley N° 6599/80, N°7495/84 de Plaguicidas y decretos reglamentarios N° 4483/95 y 5575/95.
- Decreto 4977/09, Res. 3237/10, Res. N° 038/10, Res 504/12, de Estudios de Impacto Ambiental.
- Ley 10034/2014 de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos.
- Ley N° 10284/2014 de Ordenamiento territorial del bosque nativo.

6. ORGANIZACIÓN PROPUESTA PARA LA GESTIÓN DE LA CUENCA

6.1. Fundamentos

Tomando como base dos premisas básicas (definición de los roles de gobierno y mecanismos de participación transparentes y efectivos) y la legislación existente en la provincia de Entre Ríos (en particular la Ley 9757/2007, analizada en el ítem 5), la estructura de organización propuesta para gestionar la cuenca del A° Sauce Grande deberá:

- contener a los distintos actores respetando sus roles actuales, potenciando sus fortalezas y mitigando sus debilidades.
- visibilizar las relaciones que vinculan a los distintos actores, promoviendo espacios de comunicación que brinden protagonismo a todos los interesados, en el papel que les toca representar.

diferenciar las instancias ejecutivas de las deliberativas, con el propósito de lograr un organismo que sin perder ejecutividad se retroalimente de sus propias acciones en un proceso de aprendizaje continuo.

6.2. Estructura de organización propuesta

El esquema de organización propuesto, denominado Consejo de cuenca del A° Sauce Grande, debe tener en cuenta lo expresado en el ítem anterior, agrupando actores según su perfil y valoración, de acuerdo a lo expresado en el ítem 4.2). Ello permite señalar que:

1. El consejo se estructurará en base a comités.
2. Las estructuras gubernamentales consideradas dominantes en el Análisis Social participarán en las instancias de decisión.
3. Los usuarios, debidamente organizados, participarán en las instancias deliberativas y tendrán representación en las instancias de decisión.
4. Los actores influyentes y respetados que pueden brindar apoyo técnico, legal, comunicacio-

nal o educativo, participarán en instancias de consulta.

5. Las instancias de implementación del plan de acción estarán a cargo de los organismos gubernamentales que participen de la estructura de decisión.
6. El monitoreo y seguimiento estarán a cargo de las instancias de decisión, con participación de los usuarios y eventualmente de organismos técnicos de consulta que pudieran requerirse.

Cada una de las instancias antes definida adquirirá el rango de comité, y se estructurará en un esquema ad hoc de red (Puebla, 2008), cuyo núcleo estará representado por la instancia ejecutiva. La Figura 7 grafica este esquema de vinculación mostrando cómo se articulan y relacionan los comités que componen el consejo.

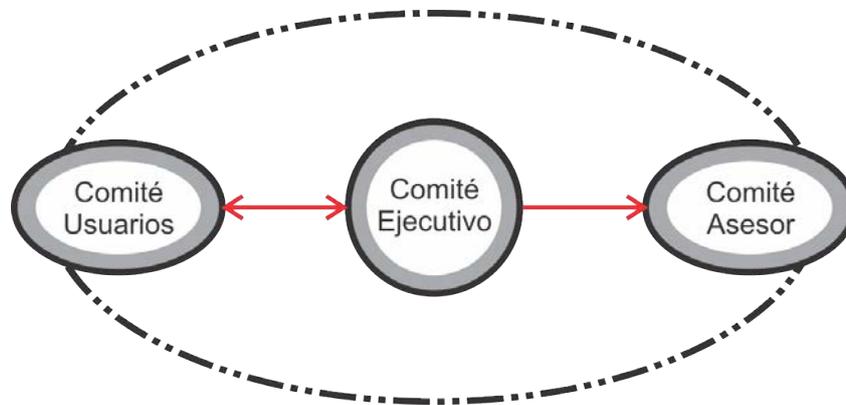


Figura 7. Estructura del Consejo de cuenca del A° Sauce Grande

En esta estructura de red corresponde al Comité Ejecutivo el carácter de núcleo. En tanto las organizaciones que se vinculan con el núcleo son el Comité de Usuarios y el Comité Asesor.

A continuación se describe la misión institucional del consejo propuesto, la integración de cada uno de los comités, sus funciones, y el esquema de articulación en el que habrán de funcionar en su condición de red.

Misión institucional del Consejo: Definir las políticas de gestión e implementar a través de los organismos que lo integran las acciones estructurales y medidas no estructurales necesarias para el funcionamiento sostenible de la cuenca del A° Sauce Grande, en un esquema de coordinación interinstitucional y teniendo en cuenta los intereses y necesidades de los distintos actores.

6.3. Componentes del Consejo

Comité Ejecutivo: Es el ámbito a través del cual se gestionarán las medidas de acción que se requieran en orden a cumplir con la misión del consejo. Es una instancia ejecutiva, pero con un esquema de

participación, consulta y asesoramiento con los restantes comités integrantes del consejo. Estará constituido por representantes de las siguientes instituciones (un titular y un alterno por cada una): Gobiernos locales (Juntas de Gobierno), Dirección de Hidráulica, Dirección General de Recursos Naturales, Ministerio de Planeamiento, Infraestructura y Servicios, Secretaría de Ambiente y Obras Sanitarias de ER. También integrarán este comité un titular y un alterno en representación de los usuarios.

Comité de Usuarios: Es una estructura deliberativa en la cual los usuarios del sistema puedan llevar sus inquietudes, establecer prioridades y elevar requerimientos al Comité Ejecutivo. Es un ámbito de expresión y de control entre pares, que promueve una participación efectiva que responda a los principios de la GIRH. Estará constituido por representantes de los industriales, los productores, las cooperativas de agua potable, las cooperativas de viviendas y las asociaciones vecinales. En este comité cada uno de los actores mencionados tendrá un representante titular y un alterno.

Comité Asesor: Es una estructura de consulta y apoyo a la toma de decisiones que interactúa con los restantes comités. Se configura como una instancia de facilitación técnica en el abordaje de los distintos problemas o situaciones de conflicto que deban ser resueltas. Es una red de instituciones del sistema científico tecnológico, organismos técnicos y actores de la sociedad civil, que aportarán sus saberes para el mejor cumplimiento de la misión del consejo. La coordinación del Comité Asesor será ejercida en forma rotativa por una de las instituciones miembros del mismo. Estará constituido por representantes de los centros de promoción de la salud, escuelas primarias, secundarias y agrotécnicas, universidades, ONG, INTA, medios de comunicación y nuevos actores que pudieran sumarse.

Las funciones señaladas para cada uno de los componentes del Consejo de cuenca del A° Sauce Grande, dan una idea del grado de articulación existente entre los mismos. En efecto, las relaciones cruzadas entre el Comité Ejecutivo y el Comité de Usuarios, y las referencias al Comité Asesor, dan una idea de la forma de vinculación, bajo el esquema de asociación en red. Esta red se sustenta en el interés común de sus actores: alcanzar el mejor funcionamiento posible de la cuenca del A° Sauce Grande, y su adecuada integración en un esquema de equidad social y sustentabilidad ambiental.

Un aspecto destacado de la estructura en red es la contribución que la misma hace a la formación de lazos y vínculos entre diversos grupos sociales, evitando el aislamiento de sus integrantes y promoviendo un mecanismo para compartir informaciones y conocimientos.

7. OBRAS Y MEDIDAS NO ESTRUCTURALES PROPUESTAS

En una lista abierta y desde una perspectiva de GIRH se proponen las siguientes obras y medidas no estructurales (identificadas en forma participativa en los talleres realizados):

- para el caso de inundaciones, sistemas de alerta entre las instituciones y la Dirección de Hidráulica, a fin de avisar sobre todo a la gente del camping del Parque Berduc y estudiar las zonas de riesgo hídrico;
- para la erosión, además de capacitar a los productores de la zona, se propone establecer una sistematización de la cuenca ya que la pérdida de suelo es alta;
- obras de sistematización de suelos, incluyendo no sólo terrazas sino también estructuras menores para control de cárcavas;
- respecto a los efluentes, capacitación y monitoreo de calidad en forma sistemática (acuerdos institucionales);
- pérdida del monte nativo: concientización, capacitación y establecer sistemas de denuncias

de vecinos para el cuidado (conciencia colectiva). Idem para la contaminación;

- con relación a las urbanizaciones, prever un plan de uso del suelo de la cuenca a fin de establecer prioridades y poner límites a la expansión;
- ampliación de zonas de conservación y cuidado obligatorias para aumentar las áreas protegidas y freno del avance de la urbanización;
- reservorios en las partes alta y media de la cuenca para almacenar y retardar escurrimientos;
- redes de monitoreo: climático, hidrológico y ambiental.

8. LINEAMIENTOS PARA PROGRAMAS COMUNICACIONALES Y EDUCATIVOS

8.1 Programas de Educación Ambiental

Se desarrollaron acciones de capacitación no formales (talleres, jornadas, etc.), destinadas a los pobladores de los barrios próximos al A° Sauce Grande, en lugares representativos de las localidades (escuelas, asociaciones vecinales, clubes, entre otros), con el objeto de analizar –entre otros temas– el grado de información y concientización por parte de los distintos actores sociales en torno a los problemas hídrico-ambientales de la cuenca.

Cabe destacar que para estas actividades se elaboraron presentaciones digitales y posters impresos con información referida al proyecto y los principales conceptos que lo sustentan; los problemas hidrológicos y ambientales de la cuenca, relacionados con el agua (contaminación e inundaciones), los suelos, los cultivos y la vegetación autóctona; la legislación provincial sobre ambiente y recursos hídricos, y lineamientos para la creación de una organización de cuenca.

En el caso específico de las escuelas, se identificaron y analizaron los diferentes modos en que los docentes, tanto de nivel primario como secundario, abordan en las aulas dichas problemáticas.

A partir de este diagnóstico, el equipo extensionista elaboró un anteproyecto de guía de actividades extracurriculares para docentes de la escuela secundaria N° 7 “Del Centenario”, de Aldea María Luisa, sobre algunos aspectos relacionados con las problemáticas ambientales e hidrológicas de la cuenca. Entre otros objetivos, esta propuesta plantea promover en los niños y jóvenes una actitud crítica y reflexiva en relación con dichas problemáticas, así como motivar su participación en acciones tendientes a mejorar las condiciones hídrico-ambientales de la cuenca y de la localidad.

8.2 Plan de Comunicación Social

Se desarrolló un plan de comunicación social para informar y generar conciencia en la población

en general y en los actores involucrados en las problemáticas de la cuenca del A° Sauce Grande. El plan incluyó:

- Diseño de un blog: <https://cuencasaucegrande.wordpress.com/>, con información acerca del proyecto, las características hidrológicas y ambientales de la cuenca, GIRH (aspectos conceptuales), actividades previstas y realizadas, y documentos de interés.
- Difusión de las actividades del proyecto en medios de comunicación de influencia en el área de estudio (periódicos, radios, televisión, Internet), a través de notas periodísticas y flyers digitales.
- Convocatoria a las actividades del proyecto a través de la distribución de afiches y flyers impresos en las instituciones más representativas de las localidades de la cuenca.
- Reuniones informativas y jornadas de educación ambiental, destinadas a los actores involucrados en la problemática.
- Difusión del proyecto y de las conclusiones de cada actividad, a través de un folleto con una presentación del proyecto y gacetillas digitales e impresas.

9. CONSIDERACIONES FINALES

El desarrollo de esta investigación ha contribuido a cambiar la visión de sobre la gestión del agua en la cuenca del Arroyo Sauce Grande. La identificación y caracterización de los actores clave en la cuenca y la realización de talleres en distintas localidades y sedes de la cuenca, constituyó una estrategia fundamental para promover la GIRH en la cuenca.

El plan de comunicación social ejecutado permitió informar y generar conciencia y realizar una validación participativa del diagnóstico preliminar de la cuenca realizado por el equipo de trabajo del proyecto.

Se brindaron fundamentos y lineamientos para la creación de una organización de cuenca. Se definió la estructura, componentes y funciones del Consejo de cuenca del Arroyo Grande, organismo que nuclea a los actores de la cuenca y habilita un espacio para el abordaje de los problemas relacionados a los recursos hídricos.

Se identificaron obras y medidas estructurales en una forma participativa y se diseñaron los lineamientos de un programa de educación y comunicación (en el caso de los primeros direccionados a las escuelas primarias y secundarias localizadas en la cuenca).

Entre los aspectos no abordados en la investigación, y que pueden brindar continuidad al proceso de mejora de la gestión de la cuenca del Arroyo Sauce Grande, se destacan una adecuación de la normativa existente (en particular, de la Ley 9757) y el análisis de instrumentos económicos, teniendo en cuenta

que un aspecto fundamental para la sustentabilidad de la organización de cuenca propuesta es su financiamiento (que debería estar prioritariamente basado en el aporte económico de los organismos y también por el de los usuarios que la integran).

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cap-Net, PNUD, GWP y EUWI. 2008. Aspectos económicos en la gestión sostenible del agua. Manual de Capacitación y Guía para Moderadores. [http://www.cap-net.org/sites/cap-net.org/files/Economics_of_water_FINAL_ES\[2\].pdf](http://www.cap-net.org/sites/cap-net.org/files/Economics_of_water_FINAL_ES[2].pdf)

Cap-Net. 2008. Manual de capacitación. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos para organizaciones de cuencas fluviales. http://www.cap-net-esp.org/document/document/262/RBO_Manual_sp.pdf

Chevalier, J. y Buckles, D. 2009. Sistemas de Análisis Social – Guía para la investigación colaborativa y la movilización social – Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC). Ottawa, Canadá – 1ª edición.

Consejo Hídrico Federal. 2003. Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina - Acuerdo Federal del Agua.

GWP. 2000. Manejo integrado de recursos hídricos. Estocolmo, Suecia. <http://www.gwpforum.org/gwp/library/TAC4sp.pdf>.

GWP. 2003. Gobernabilidad efectiva del agua. http://www.gwptoolbox.org/images/stories/gwplibrary/background/tec_7_spanish.pdf

GWP e INBO. 2009. Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas. Estocolmo Suecia. http://www.cap-net-esp.org/document/document/275/RIOC_GWP_Manual_para_la_gestion_integrada.pdf

Lozeco, C. 2013. Tesis Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos FICH – UNL - “Desarrollo de un esquema de gestión integrada para los colectores de drenaje de la ciudad de Cipolletti (Río Negro, Argentina)”

Puebla, P. 2008. Notas del Curso “Introducción a la GIRH - Parte II” – Maestría en GIRH. Universidad Nacional de Cuyo - Universidad Nacional de Córdoba - Universidad Nacional del Litoral.

Rietbergen-McCracken, J. y Narayan, D. 1998. Participation and Social Assessment – Tools and techniques. World Bank, Washington DC.

SOLANES. 1998. Manejo integrado del recurso agua, con la perspectiva de los principios de Dublín. Revista de la CEPAL, No 64. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile.

Torregosa Martí, M. 2007. El modelo socioeconómico de gestión de los recursos hídricos en la Comarca de La Marina Baja (Alicante). Un enfoque de GIRH. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. Alicante. España.

Urrutia, A. 2004. Identificación de los Actores Claves para el Manejo Integrado de las Subcuencas de los ríos Los Hules, Tinajones y Caño Quebrado. (USAID United States Agency for International Development).

Van Hofwegen, P. y Jaspers F. 2000. Marco analítico para el manejo integrado de recursos hídricos: lineamientos para la evaluación de marcos institucionales. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), febrero de 2000, Washington, D.C. (disponible en Internet: <http://www.iadb.org/sds/doc/ENV%2DPVanHofwegenS.pdf>).

MODELADO DE DINÁMICA DE SEQUÍAS PARA PREDICCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO

MATHEMATICAL MODELING OF DROUGHT DYNAMICS FOR PREDICTION OF WILDFIRES IN THE STATE OF MORELOS, MEXICO

Vilchis Francés, A.Y.¹; Díaz-Delgado, C.; Gómez Albores, M.A.; Bâ, K.M.; Becerril Piña, R.; Mastachi Loza, C. A.

Resumen

La sequía se define como un periodo prolongado de escasez de recursos hídricos por debajo de niveles normales, que provoca efectos adversos sobre los sistemas de producción de recursos. Según el IPCC, cada vez más se presentarán episodios de sequía severos por lo que se incrementará el peligro de incendios en el mundo. Sin embargo, los incendios forestales son parte del proceso natural de regeneración y limpieza del ambiente, pero las actividades antropógenas han desequilibrado este proceso. El objetivo de este trabajo consistió en construir un modelo dinámico (diario) de regresión logística, para detección de zonas con peligro por ignición de incendios forestales. La propuesta es aplicada a la región geográfica con coordenadas extremas 18.1845° a 20.4435° de Latitud Norte, y 98.34525° a 100.8495° de Longitud Oeste, que incluye completamente los territorios estatales de Morelos y de México. El periodo disponible de información para construcción del modelo fue de 2006 a 2009, donde se obtuvo una eficiencia del 98 % en la predicción de incendios para el año 2009. Más del 80 % de los incendios forestales ocurridos resultaron con categoría de alto y muy alto peligro de ignición, concentrándose en coberturas de bosques de pino y mesófilo de montaña. Con este tipo de técnicas alternativas, se espera poder coadyuvar en la mitigación de incendios forestales en sitios donde no se cuenta con datos históricos de incendios, así como tomarse de base para la definición de sistemas de alerta temprana contra incendios forestales en el estado de Morelos.

Palabras clave: Déficit de humedad, regresión logística, sequía.

Abstract

Drought is defined as a prolonged period of scarcity of water resources below normal levels, which causes adverse effects on resource production systems. According to the IPCC, more and more severe drought episodes are expected to increase the fire hazard in the world. However, forest fires are part of the natural process of regeneration and cleanliness of the environment, but anthropogenic activities have unbalanced this process. The objective of this work was to construct a dynamic (logistic) logistic regression model for the detection of zones with danger due to ignition of forest fires. The proposal is applied to the geographic region with extreme coordinates 18.1845 ° to 20.4435 ° North Latitude, and 98.34525 ° to 100.8495 ° West Longitude, which completely includes the state territories of Morelos and Mexico. The available information period for the construction of the model was from 2006 to 2009, where 98% efficiency in fire prediction was obtained for 2009. More than 80% of the forest fires occurred were classified as high and very high danger of ignition, concentrating on pine forest cover and mountain mesophyll. With this type of alternative techniques, it is hoped to be able to contribute to the mitigation of forest fires in places where historical fire data are not available, as well as being used as a basis for the definition of early warning systems against forest fires in the state of Morelos.

Keywords: Moisture deficit, logistic regression, drought.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de sequía no debe verse como un problema, sino como una condición natural y recurrente de algunas regiones del mundo (Rossi et al., 2005 y Birkel, 2006). Su lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, dificulta determinar el inicio, duración y extensión mientras ocurre. Por tal motivo, resulta complicado definir medidas de mitigación para los severos impactos que ésta genera. Existe una diversidad de estudios que permiten analizar la sequía. Sin embargo,

sigue considerándose como uno de los fenómenos naturales menos comprendido (Fernández et al., 2009). Por la complejidad del fenómeno, los gobiernos aumentan la vulnerabilidad ante la sequía debido a sus propias políticas de manejo de recursos hídricos (PNUD, 2004). Por lo general, estas son acciones reactivas o de emergencia que se aplican cuando se está inmerso en el evento (Arrojo, 2008 y Moneo, 2008). De acuerdo con el reporte del 2008 generado por el grupo intergubernamental de

¹ Universidad Autónoma del Estado de México.
Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua.
Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.5, Unidad San Cayetano, Toluca México.
ayvilchisf@uaemex.mx, cdiazd@uaemex.mx, magomez@uaemex.mx, khalidou@uaemex.mx, rbecerrilp@uaemex.mx, camastachil@uaemex.mx

expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2008), se presentarán muy probablemente episodios de sequía más severos y más largos en el mundo, por lo que disminuirá la disponibilidad del agua tanto espacial como temporalmente y aumentará la competencia por el recurso. Ante este panorama, la Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia y la Cultura (UNESCO) recomienda concebir e implementar metodologías para adaptarse a la escasez de agua durante la sequía con objeto de mitigar sus impactos (PNUD, 2004).

Por otra parte, los elementos del tiempo atmosférico tienen influencia en la ignición, propagación y extinción del fuego en un incendio forestal (Bonazountas et al., 2007). El comportamiento de la temperatura ambiental previo a la temporada de incendios, provee información sobresaliente para identificar zonas con potencial de ignición (Arnaldos et al., 2004). A mayor temperatura, el combustible natural (pastos y matorrales) perderá humedad teniendo pocas posibilidades de recuperarla en épocas de estiaje, ya que los valores mayores del déficit de humedad están asociados en estas temporadas (Ruiz y Reyes, 2005). Aunado a la temperatura, la velocidad y dirección del viento, favorecen el calentamiento de los combustibles y la pérdida de humedad de éstos, haciéndose propicios para llegar a temperatura de deshidratación con facilidad y desencadenar el proceso de combustión (Ayala y Olcina, 2002). Asimismo, la radiación solar incide directamente en la humedad relativa del entorno. A un incremento de radiación solar se asocia un decremento de la humedad relativa, misma que reduce el calor necesario para el inicio de la fase de ignición (Villers, 2006). De igual forma, la pendiente y orientación de ladera son factores que contribuyen en la propagación de los incendios (Arnaldos et al., 2004). La pendiente provee continuidad vertical a la vegetación contribuyendo a la proximidad de los combustibles y en la aparición de vientos, que secarán la vegetación al ascender, además de aumentar la velocidad del viento y la formación de corrientes de convección (Ruiz y Reyes, 2005). Por otra parte, la orientación de ladera es la responsable de la cantidad de insolación que reciban los combustibles en las zonas de umbría o solanas, por lo que su influencia se manifestará en la humedad tanto de éstos como del ambiente circundante (Villers, 2006). Las laderas orientadas SW, S y SE (solanas) serán las que reciban mayor cantidad de calor, por lo que los registros de temperatura serán mayores y la humedad de los combustibles será menor. Además, estas zonas serán más propensas a crear corrientes de convección ascendentes (Ruiz y Reyes, 2005).

La precipitación pluvial de las zonas boscosas es la principal fuente de humedad contenida en el suelo, en el ambiente y en los combustibles. Este elemento meteorológico interviene en la formulación de modelos de peligro y riesgo de incendios, a través de la caracterización de su comportamiento regional

como evaluación del déficit de humedad (Julio, 1990). La temporada de incendios forestales está fuertemente vinculada con la temporada de ausencia de precipitación (Ciesla, 1996). Conforme avance el periodo de ausencia de precipitación, aumentará el peligro de incendio, pues los combustibles se encontrarán mayormente deshidratados y la temperatura de ignición podrá alcanzarse en menor tiempo (Villers, 2006).

Los incendios de los ecosistemas forestales son parte del proceso natural de regeneración y limpieza del ambiente. Sin embargo, la intervención del hombre ha desequilibrado este proceso, lo cual ha puesto en riesgo los recursos naturales de su entorno (Martin et al., 1998). En efecto, la ocurrencia y propagación de incendios dependen de las condiciones climatológicas de una región así como de las actividades antrópicas, que definen no solamente los periodos húmedos y secos, sino también las relaciones culturales entre el hombre y el medio (González, 2003). Con base en el régimen de lluvia mensual en México, los meses de febrero, marzo y abril son los más secos del año (CONAGUA, 2012a). Esto provoca que durante esos meses, los periodos de estiaje sean más largos y que los combustibles naturales sean más susceptibles a los incendios de alta severidad (CONAFOR, 2017).

De acuerdo con datos de la FAO (2003), México se encontraba en el 12° sitio a nivel mundial por la superficie forestal con que contaba (33.5 millones de ha de bosques que representaban el 17% del total nacional). Sin embargo, entre 1993 y 2002 se perdieron 3.17 millones de ha de selvas y bosques. Las causas principales de estas pérdidas fueron la deforestación por tala clandestina y controlada, así como el cambio en uso de suelo e incendios forestales (SEMARNAT, 2010). En el 2010, el Estado de México ocupó el 14° lugar a nivel nacional en afectaciones de bosques por causa de incendios, con una tasa promedio anual de 2.8 ha por evento, siendo la media nacional de 19.14 ha en ese año (PROBOSQUE, 2010). Tanto a nivel mundial como nacional, los recursos forestales siguen amenazados por los incendios. Solamente durante la temporada de estiaje del 2016, en el Estado de México se presentaron 1 483 incendios con una pérdida de 5 932 ha, y en el estado de Morelos hubo solo 193 incendios pero con 1 424 ha afectadas (CONAFOR, 2017).

Aunque en México existen esfuerzos institucionales para el manejo de los incendios (Programa operativo de combate y prevención de incendios), año con año las pérdidas continúan reflejándose a través del deterioro del paisaje en el país. Asimismo, las presiones de tipo económico y social a las que está sometido el recurso forestal, colocan a las acciones de manejo y conservación en desventaja ante su continuo aprovechamiento y sobreexplotación (PROBOSQUE, 2010).

Por lo anterior, se requiere diseñar metodologías que permitan alertar, mitigar, controlar y/o detener la pérdida de recursos forestales. Estos procesos pueden darse, por ejemplo, a través del diseño de herramientas de apoyo en la toma de decisiones para alerta y prevención de incendios forestales. El objetivo de este trabajo consistió en construir un modelo dinámico a escala diaria, para detección de zonas de peligro por ignición de incendios. Particularmente se elaboró el modelo para el Estado de México, ya que se cuenta con base de datos de incendios. Posteriormente, se estimó la probabilidad de incendios para el estado de Morelos con base en los datos de cobertura semejante al Estado de México. Este proceso propone el ajuste de un modelo matemático de regresión logística y el empleo del índice de sequía efectiva (EDI, *Effective drought index*, por sus siglas en inglés), denominado y propuesto así por Byun y Wilhite en 1999. Este índice evalúa el progreso del déficit de humedad pluvial con un paso de tiempo diario (Smakhtin y Hughes, 2004), por lo que fue seleccionado para la estimación de indicadores del déficit de humedad. Asimismo, se utilizó el software Idrisi (Eastman, 2012) para procesamiento de imágenes georeferenciadas, mediante sus herramientas de análisis estadístico, el cual facilitó la evaluación espacial de las variables, que en este trabajo se propusieron como las posibles precursoras de la ocurrencia de incendios para los años 2006 a 2009 en la zona de estudio.

MATERIALES

La zona de análisis para aplicación del método propuesto corresponde al territorio completo de los estados de Morelos y de México, ubicados en la parte central de la República Mexicana. Para el análisis de condiciones del déficit de humedad, se tomaron en cuenta las estaciones climatológicas con datos diarios de precipitación (CONAGUA, 2012c). Los años analizados fueron del 2006 al 2009, ya que la base de datos de incendios comprendía el mismo periodo. El año 2009 fue seleccionado para validación del método. Para cuantificar el déficit de humedad en la zona, se toma la información de lluvia para el Estado de México y de Morelos del periodo 1962 a 2009, quedando la base de datos de precipitación diaria, comprendida por 143 y 82 estaciones climatológicas respectivamente. Los datos de viento corresponden a los relacionados con la velocidad máxima mensual registrada de los observatorios sinópticos de: Chapingo, México-DF, Morelia, Pachuca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Toluca y Tulancingo (CONAGUA, 2012b).

De acuerdo con PROBOSQUE (2010), la temporada de incendios forestales en el Estado de México se encuentra definida en los primeros meses del año, con énfasis en los meses de marzo y abril (66.5% del total de incendios). Los incendios predominantemente se inician entre las 06:00 y las

18:00 horas, enfatizándose en el horario de 12:00 a 15:00 horas, coincidente con las horas de mayor insolación (poco más del 50% de los casos). Las brigadas constituidas para la prevención y combate de incendios en el territorio estatal, atienden de inmediato el aviso de incendio. Por lo que su duración oscila entre 1 y 5 horas mayormente. Por otro lado, los 2.320 incendios registrados en los bosques mexiquenses, impactaron 8.136 ha entre los años 2006 y 2009. La tendencia general son los eventos de áreas menores a 4 ha en el periodo 2006 a 2009. Cabe señalar que el bosque de pino es el más abundante en el Estado de México con 250 574 ha de las 740 981 ha totales. Por lo tanto, esta especie es la más afectada por los incendios forestales con el 50%, seguidos los bosques de encino y oyamel con el 28% y 13%, respectivamente (PROBOSQUE, 2010).

Con respecto a las causas que provocan incendios, se destaca la vinculación estrecha entre las actividades agrícolas y pecuarias con el origen de éstos. Dado que la práctica de la quema-roza es habitual y frecuentemente, se sale de control por el imprevisto cambio de dirección del viento, lo que se traduce en que el 35% de los eventos tienen este inicio. Misma correlación existe con causas no determinadas, que representan el 30%, de las que según los brigadistas son provocadas por los agricultores, sin embargo no lo hacen constar así en los reportes, pues no es posible su demostración. Por otro lado, las zonas boscosas son tradicionalmente frecuentadas por paseantes de fin de semana o en periodos vacacionales, por lo que las fogatas de las que hacen uso y que no son ahogadas totalmente suelen reactivarse y transferirse a la vegetación, provocando el 17% de los eventos. Otra actividad que integra las causas comunes de ignición son las actividades forestales con el 11% (PROBOSQUE, 2010).

MÉTODO

1. Estimación de indicadores para déficit de humedad

El índice de sequía efectiva propuesto por Byun y Wilhite (1999), se introduce el concepto de precipitación efectiva EP (*Effective precipitation*, por sus siglas en inglés) como la reducción diaria de la precipitación a través del tiempo. Donde la duración de días precedentes para cálculo de EP puede ser de 15 días para los recursos totales de agua almacenada en el suelo para un corto periodo, ó 365 días para recursos hídricos disponibles en todo el ciclo hidrológico. Para este estudio, se utilizó un valor de 15 días anteriores para cálculo de EP, por considerarlo como el periodo más significativo del contenido de agua en la cobertura incendiabile. La disminución de la precipitación a través del tiempo se calcula con la ecuación 1. Se utiliza la precipitación

de m días anteriores que se agrega al total de los recursos de agua como una forma del promedio de precipitación de los m días (Byun and Lee, 2002).

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left(\sum_{m=1}^n P_m / n \right) \quad (1)$$

Donde EP_i es la precipitación efectiva diaria (mm); P_m es la precipitación de m días anteriores (mm) e i es la duración de la suma de los días anteriores. La obtención de la media de EP (MEP) se estima como el promedio móvil de 5 días anteriores de EP. Después se calcula la desviación de EP con respecto a MEP (ecuación 2), al cual se le denomina desviación de EP (DEP, Deviation of EP por sus siglas en inglés).

$$DEP_i = EP_i - MEP_i \quad (2)$$

En la cual DEP_i es la desviación de EP_i respecto a MEP (mm) y MEP_i es la media de la precipitación efectiva (mm). Con DEP_i se estima el segundo indicador al que se le denomina precipitación efectiva estandarizada (SEP , *Standardized value of DEP* por sus siglas en inglés), ecuación 3.

$$SEP_i = \frac{DEP_i}{std(EP_i)} \quad (3)$$

Donde SEP_i es la precipitación estandarizada de EP_i y $Std(EP_i)$ es la desviación estándar de cada día de EP_i , en este caso, para cada dato se incorpora

una media móvil de 5 días anteriores de desviación estándar.

Con el cálculo de SEP es posible identificar el déficit de humedad normalizado (valores negativos de SEP) en cada una de las estaciones de observación. Por lo tanto el déficit acumulado de humedad a nivel diario ANES (*Accumulation of consecutive negative SEP*, por sus siglas en inglés), se estima como la suma de valores de SEP negativos consecutivos en un periodo con déficit de humedad. Finalmente, de acuerdo con el número de días consecutivos con déficit de EP estandarizada en cada periodo con déficit, se obtiene el indicador CNS (*Consecutive days of negative SEP*, por sus siglas en inglés) con el cual se determina la duración de cada periodo con déficit de humedad en la zona de análisis. Para el objeto de este estudio y en lo subsecuente, se llamarán las últimas variables como: ANES (Déficit acumulado de humedad) y CNS (Días con déficit de humedad).

2. Identificación de regiones homogéneas

Primeramente se construyen imágenes territoriales de las distintas variables que se tomarán en cuenta para la identificación de regiones homogéneas. Variables de incendios como amplitud de afectación, la duración, la hora de inicio y la carga de combustible disponible. Variables de tipo geográfico como latitud y longitud. Variables meteorológicas como el déficit de humedad (ANES y CNS), así como variables de cobertura de suelos (cuadro 1).

Cuadro 1. Variables para identificación de regiones homogéneas

TIPO DE VARIABLE	CARACTERÍSTICA
INCENDIOS	1. Amplitud de afectación (ha) 2. Duración (hrs) 3. Hora de inicio (hrs) 4. Carga de combustible (Ton/ha)
GEOGRÁFICA	1. Latitud (grados) 2. Longitud (grados) 3. Orientación de laderas (grados) 4. Pendiente de laderas (grados)
CLIMATOLÓGICA	1. CNS: días con déficit de humedad (días) 2. ANES: déficit de humedad (mm) 3. Viento máximo mensual promedio (m/s)
SUELOS	1. Cobertura y tipo de suelo

Después, se continúa con la identificación de las variables de restricción como la carga de combustible y tipo de suelo tanto para el Estado de México como para el estado de Morelos. Para la definición de esta carga, se toma en cuenta el modelo de la *National Fire Rating System* (NFDRS) de Estados Unidos, asignando los valores de carga de acuerdo con la cobertura vegetal del Estado

de México (PROBOSQUE, 2010). Por lo tanto, se consideran tres tipos de carga de combustible: 8.59 Ton/ha para el bosque de encino (*Quercus rugosa*, *Q. macrophylla*, *Q. crassipes*, *Q. elliptica*, *Q. acutifolia* y *Q. castanea*), bosque de oyamel (*Abies religiosa*) y bosque de otras coníferas como las especies de táscale *Junniperus spp* (*Juniperus 26 laccida* y *J. deppeana*); 12.34 T/ha para el

bosque mesófilo de montaña (*Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Meliosma dentata*, *Oreopanax xalapensis*, *Prunus spp*, y *Quercus laurina*); y 29.68 Ton/ha para bosque de pino (*Pinus douglassiana*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote*) (Nava et al., 2010). Los tipos de cobertura por el tipo de suelo que le corresponde a cada carga de combustible son: para la carga 1, bosques de encino y oyamel (cobertura 1); para la carga 2, selva baja caducifolia (cobertura 2); y para carga 3, bosques de pino y mesófilo de montaña

(cobertura 3). Para el caso del estado de Morelos, las coberturas que se toman en cuenta son las mismas que para el Estado de México, cobertura 1: bosques de encino, oyamel y táscate; cobertura 2: bosque mesófilo de montaña y cobertura 3: bosques de pino. Cabe mencionar que el Estado de Morelos solamente tiene estos tipos de coberturas en las partes altas y colindantes con el Estado de México y el Distrito Federal. Los tipos de coberturas vegetales que se usan para el análisis de este proyecto se muestran en la figura 1.

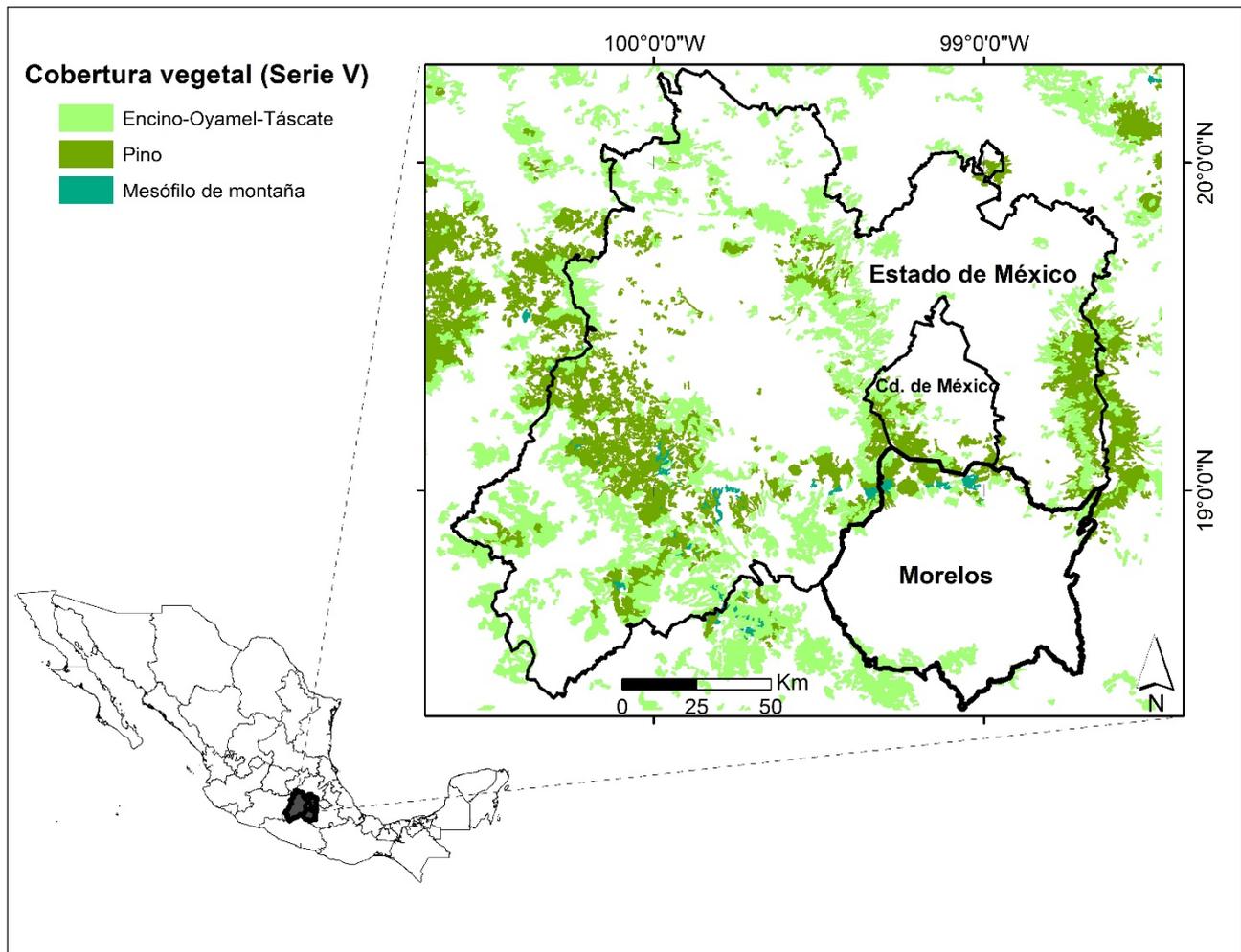


Figura 1. Coberturas vegetales análogas en el Estado de México y el estado de Morelos.

Una vez obtenidas las imágenes de restricción, se realiza el análisis de componentes principales (ACP) con el software idrisi, basado en matrices de correlaciones y covarianzas (ecuación 4), para identificar las combinaciones de variables que más incidencia tienen en la formación de grupos. Los nuevos componentes principales, serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí (Kanellou et al., 2012).

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{XY}{\sigma'_x \sigma'_y} \quad (4)$$

Donde S es el producto normalizado de dos variables; N es el total de observaciones de las variables X e Y; σ'_x es la desviación estándar de la variable X y σ'_y es la desviación estándar de la variable Y.

Después, se forma el primer grupo con todas las variables independientes (amplitud de incendio, duración de incendio, inicio de incendio, latitud, longitud, CNS y ANES). Luego se obtiene el nivel de significancia del grupo por ACP. Después se elimina la variable que presenta mayor correlación con otra de las variables y vuelve a realizarse el ACP para obtener el nivel de significancia del nuevo grupo. El proceso continúa hasta que se agotan las

combinaciones de variables, con la selección de la mejor significancia y el menor número de variables.

3. Construcción del modelo de regresión logística

El modelo se construye con la identificación de una variable dependiente y diversas variables independientes, de acuerdo con el modelo de Hosmer y Lemeshow (2000). Solamente la variable dependiente es del tipo dicotómica, en la cual se asigna el valor de 1 para la ocurrencia del fenómeno en estudio y 0 para el caso contrario. La base del modelo está identificada por las ecuaciones 5 y 6:

$$f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (5)$$

$$z = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k \quad (6)$$

En la cual β_0 es la constante de la regresión y β_k el factor de ponderación de la variable x_k . El resultado de la función $f(z)$ será un valor para cada celda entre 0 y 1 que estima la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

En este trabajo, la variable dependiente es identificada como la amplitud de afectación de los incendios. Se eligió esta variable debido a que más del 80% de los eventos de 2006 a 2009 se presentaron en un área menor de 4 ha. Como variables dependientes se consideran: CNS, pendiente, orientación de laderas y viento (cuadro 1). Se integra el modelo de regresión logística para cada una de las zonas semejantes y para el semestre de análisis (enero-junio). Así mismo, el software idrisi proporciona un coeficiente de ajuste de la regresión logística llamado ROC (*Relative Operating Characteristic*, ROC por sus siglas en inglés). El ROC es un estadístico excelente que evalúa la validez espacial (entre mapas booleanos) del modelo de regresión logística,

para pronosticar la ubicación de ocurrencia de una clase comparado con una idea de referencia, que es el mapa de la realidad contra mapa de conveniencia (Pontius, 2002). Si ROC es igual a 1, demuestra una asociación perfecta entre las variables analizadas; si ROC es menor a 0.5, demuestra un ajuste aleatorio entre las variables. Para comprobar la efectividad del método propuesto a través de regresión logística multivariable, se efectúa su validación con los datos diarios para incendios correspondientes a un año. Para que sea un buen modelo de ajuste, se espera que al menos el 75% de los datos del modelo coincidan con los datos reales del año por validar.

RESULTADOS

Para el Estado de México, se encontró que las características con más influencia en la agrupación de zonas semejantes por medio del ACP fueron CNS y latitud. Con estas variables, se utilizó el método de análisis jerárquico de agrupamiento, para obtener espacialmente las tres coberturas con características homogéneas (figura 2). El modelo se integró por tres sub-modelos, donde cada uno corresponde al tipo de zona homogénea, de acuerdo con las variables que provocan mayormente los incendios como: orientación y pendiente de laderas, velocidad del viento y días con déficit de humedad (cuadro 2). Los resultados de probabilidad de ocurrencia (P) se ordenaron de mayor a menor para proponer cuatro categorías de peligro de ignición de incendios de acuerdo con el porcentaje acumulado de observaciones. La categoría denominada peligro “BAJO” fue para el 5% de los datos, con valores de probabilidad de ocurrencia $P < 0.678$. La categoría de peligro “MODERADO” para el 15% acumulado de datos, con valores de probabilidad $P = [0.678, 0.758]$. Finalmente, para las categorías de peligro “ALTO” y “MUY ALTO” con el 30% y mayor al 50% de datos acumulados, sus probabilidades de ocurrencia fueron $P = [0.758, 0.820]$ y $P > 0.820$ respectivamente.

Cuadro 2. Ecuaciones generales para probabilidad de incendios

Semestre	Cobertura	ROC	Coeficientes de las variables				
			Bo	Fija	Diaria	Fija	Mensual
				B1	B2	B3	B4
			Orientación	CNS	Pendiente	Velocidad viento	
1	0.96	-6.11	2.55	-3.78	-3.33	12.72	
Ene-Jun	2	1	-17.82	23.97	25.87	0	0
	3	0.97	-7.85	-1.51	3.1	0.91	7.47

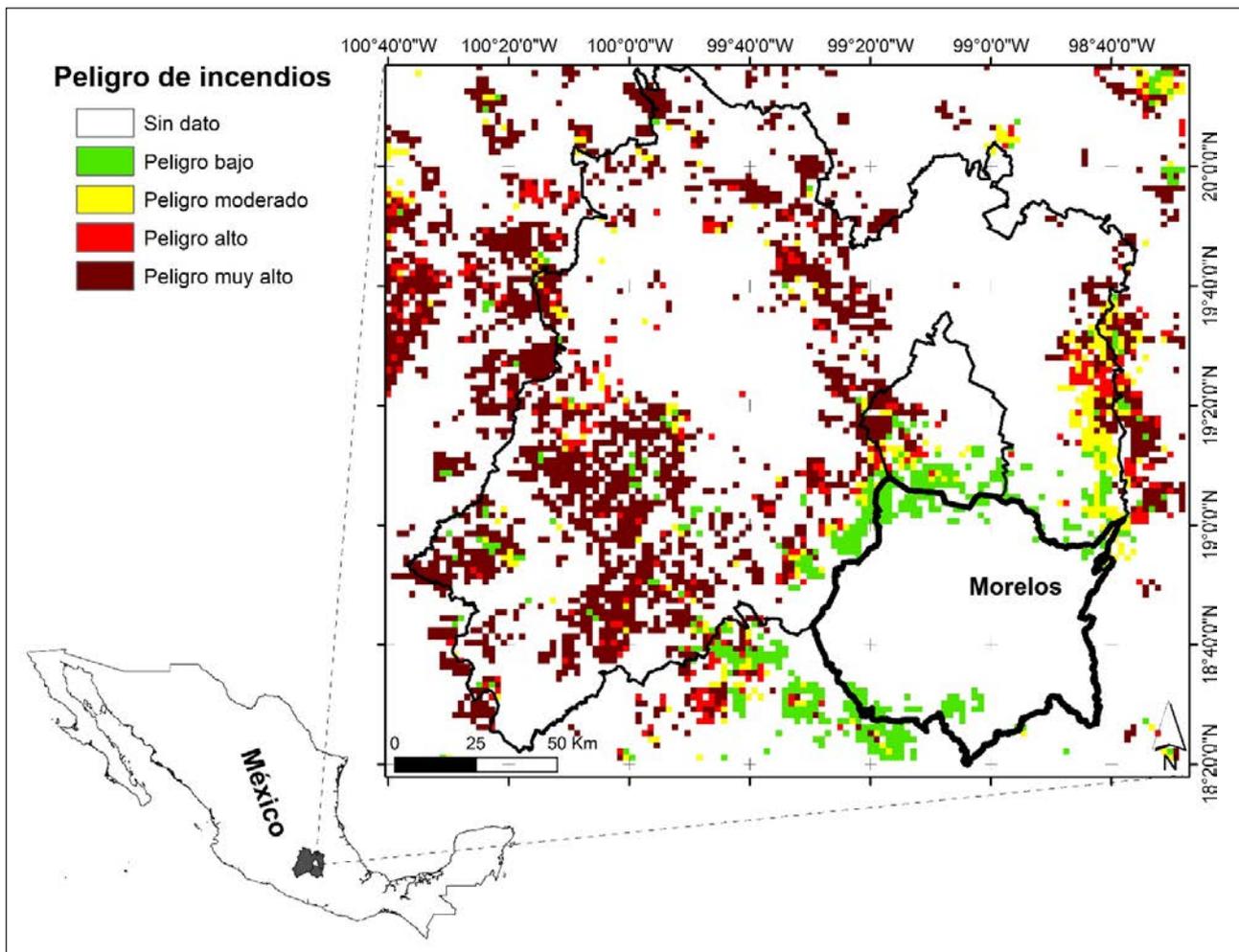


Figura 2. Peligro de incendios en el Estado de México y estado de Morelos.

De los eventos ocurridos del año 2006 al 2009, más del 80% de éstos resultaron con una clasificación de alto y muy alto peligro de incendio, correspondiente a una probabilidad mayor de 0.758, debido a que convergieron los valores de las variables más favorables para la ocurrencia de incendios en los sitios de análisis. Asimismo, se observó que de acuerdo con las características similares del estado de Morelos, como tipo de cobertura, orientación y pendiente de laderas, pudo estimarse la presencia de incendios en el territorio morelense (figura 2).

De acuerdo con la literatura consultada, estudios como el de Carrillo et al. (2012) propusieron un modelo de peligro de incendios forestales para el estado de Puebla (México), el cual consistió en un modelo estático de características que favorecen los incendios forestales. Otras investigaciones como las reportadas por Vilar (2006), Martínez et al. (2008) y Vega et al. (2008) se centran particularmente en establecer la influencia antrópica en la ocurrencia de incendios forestales.

CONCLUSIONES

Se demostró que esta metodología tiene una efectividad del 98 % para predicción de condiciones propicias de ocurrencia de incendios forestales para el Estado de México. Cabe mencionar que este análisis fue acotado solamente para coberturas de coníferas (bosques de: pino, oyamel, encino, táscate y mesófilo de montaña), que para el estado de Morelos, estas coberturas representan tan sólo un 10% de su superficie estatal. Para futuros estudios más completos, deberán analizarse coberturas de selva caducifolia, pastizales y matorrales, que son las coberturas vegetales que más tiene el estado de Morelos. También sería necesario que el estado de Morelos pudiera conformar una base de datos de incendios ocurridos (geolocalización del sitio afectado, cobertura afectada, amplitud del área afectada, etc.), para validar en esta región, la certidumbre del método propuesto.

Esta propuesta puede mejorar los sistemas de alerta contra incendios ya instalados, y en consecuencia,

mejorar los tiempos y protocolos de respuesta en el control de éstos, así como mejorar el diseño de la cadena de suministro, al instalar en zonas estratégicas los centros de control y mando de brigadistas.

Se observaron algunas carencias en la información de tipo climatológico, particularmente se requiere, además de la medición de las variables clásicas, estudios de tipo geoestadístico para determinación de la ubicación idónea de estaciones climatológicas complementarias, que midan en tiempo real datos de humedad del suelo, dirección y velocidad de viento.

Asimismo, se espera que con este tipo de métodos, se ayude en la identificación y mitigación de incendios forestales en sitios donde no se cuente con datos históricos de estos eventos, así como tomarse de base para la definición de sistemas de alerta contra incendios forestales en el estado de Morelos.

Finalmente, esta investigación pretende auxiliar en la formulación de elementos básicos de planeación estratégica para el control y mitigación de impactos ambientales y económicos por incendios forestales en cualquier región, pero particularmente para aquellas entidades que no cuenten con bases de datos diarios de incendios.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) el apoyo otorgado bajo la modalidad de Proyectos de Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales 2014, con número de financiación 248498.

REFERENCIAS

Arnaldos, J., Navalón, X., y Pastor, E. 2004 Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Ed. Mundi-Prensa. ISBN: 9788484761204. España. 414 p.

Arrojo A., P. 2008. Prevenir las sequías desde la planificación en perspectivas de cambio climático. Revista ambiente junio de 2008, pp. 34-40. España.

Birkel D, Ch. 2006. Sequía hidrológica en Costa Rica ¿Se han vuelto más severas y frecuentes en los últimos años?. Revista Reflexiones No. 85 (1-2), pp. 107-116.

Ayala, F.J. y Olcina, J. 2002. Riesgos naturales. Ed. Ariel Ciencia. ISBN: 84-344-8034-4. España. 1512 p.

Bonazountas, M., Kallidromitou, D., Kassomenos, P. y Passas, N. 2007. A decision support system for managing forest fire casualties. Journal of Environmental Management 84: 412-418.

Byun, R. y Lee, K. 2002. Defining three rainy seasons and the hydrological summer monsoon in Korea using available water resources index. Journal of the Meteorological Society of Japan, 80-1: 33-44.

Byun, R. y Wilhite, A. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. Journal of Climate. American Meteorological Society. September 12: 2747-2756.

Carrillo, R.L., Rodríguez, D., Techikoué, H., Monterroso, I. y Santillán, J. 2012. Análisis de peligro espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. Interciencia. Septiembre 37-9: 678-683.

Ciesla, M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Estudio FAO Montes 126. Roma. 146 p.

CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2017). Temporada de incendios 2016, alerta ante sequía. Disponible en línea [Página consultada 26-junio-2017]: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/component/content/article/6/356>.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2012a. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Comisión Nacional del Agua-CONAGUA. México. 132 p.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2012b. Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. Información de Observatorios Sinópticos de México. Disponible en línea [Página consultada 16-marzo-2012]: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=93.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2012c. Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. Información de estaciones climatológicas normales en México. Disponible en línea [Página consultada enero 2012]: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75..

Eastman, R. 2012. Idrisi Selva Manual. Clark University. Sitio web: www.clarklabs.org

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2003). XII Congreso Forestal Mundial. Canadá. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/5387/es/>. [Página consultada diciembre 2011].

Fernández R., A. O., González, Y.A. y Faife, F. N. 2009. Análisis espacio-temporal de sequías meteorológicas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso, mediante el índice de precipitación estandarizada. Voluntad Hidráulica, pp. 22-29. Cuba.

González Y. 2003. Modelos de riesgo de incendios en coberturas vegetales "Región Andina". XII World Forestry Congress Québec. 6 p.

Hosmer W and Lemeshow L. (2000). Applied Logistic Regression. 2nd ed. JohnWiley and Sons, Inc. New York. 392 p.

IPCC. 2008. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. (Pachauri, R. K. y Reisinger, A. –editores-). 1a. impresión 2008, 114p. Suecia.

- Julio G. 1990. Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile. Bosque Valdivia. Chile.11-2: 59-72.
- Kanellou, C, Spyropoulos, V, y Dalezios, R. 2012. Geoinformatic intelligence methodologies for drought spatiotemporal variability in Greece. *Water Resources Management*. 26: 2089-1106.
- Martin, M.P., Chuvieco, E. y Aguado, I. 1998. La incidencia de los incendios forestales en España. *Serie Geográfica*. 7: 23-36.
- Martínez, J., Chuvieco, E. y Martín, P. 2008. Estimación de Factores de Riesgo Humano de Ignición en España Mediante Regresión Logística. *Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global*. pp. 281-293.
- Moneo L., M. 2008. Drought and climate change impacts on water resources: management alternatives. Tesis doctoral del departamento de economía y ciencias sociales agrarias 373p. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Nava, G, Endara, A, Regil, H, Estrada, C, Arriaga, C.M. y Franco, S. 2010. Los bosques y selvas del estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México. ISBN 9786074220988. México.
- Pontius, G. 2002. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68-10: 1041-1049.
- PNUD. 2004. La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 157p. EEUU.
- PROBOSQUE, Protectora de Bosques del Estado de México. 2010. Programa de prevención y combate de incendios. México. Disponible en línea [Página consultada noviembre de 2010]:<http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/probosque/proteccion/incendios>.
- Rossi, G., Cancelliere, A. y Giuliano, G. 2005. Case study: multicriteria assessment of drought mitigation measures. *Journal of water resources planning and management*. ASCE November-December 2005, pp. 449-457.
- Ruiz S., J. D., y Reyes, P., F. J. 2005. Geografía física aplicada. Serie: Manuales. Universidad de Málaga España.
- SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Inventarios forestales de México. Disponible en línea [Página consultada en noviembre de 2010]: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_RFORESTA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce.
- Smakhtin, U. y Hughes, A. 2004. Review, Automated Estimation and Analyses of Drought Indices in South Asia, IWMI Working Paper No. 83 – Drought Series Paper N 1. IWMI: Colombo; 24 p.
- Veja, C., Ortiz, Ch., Canet, R., Sánchez, I. y Queralt, D. 2008. Practical Application of a Daily Prediction Model for the Occurrence of Human-Caused Forest Fires in Catalonia. *Proceedings of the Second International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: A Global View*. pp. 567-579.
- Vilar, L. 2006. Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Granada. pp. 531-543. Disponible en línea [Página consultada octubre 2011]: http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo_Granada.pdf.
- Villers, L. 2006. Incendios forestales. *Ciencias*. Enero-Marzo 081: 61-66.

SEAWATER DESALINATION, THE SOLUTION FOR DRINKING WATER AUGMENTATION IN ARUBA FOR MORE THAN 85 YEARS: A HISTORICAL OVERVIEW

DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR, LA SOLUCIÓN PARA EL AUMENTO DE AGUA POTABLE EN ARUBA DESDE HACE MÁS DE 85 AÑOS: UN PANORAMA HISTÓRICO

Marchena, Filomeno A.¹; Halman, Johannes I. M.²

Abstract

Aruba, one of the Dutch Caribbean islands with a semi-arid climate, has practically no natural freshwater resources. It is geographically located approximately 20 miles north of the coast of the Península de Paraguaná of Venezuela. In the pre-industrial era, before seawater desalination, the small population (mainly immigrated aboriginal inhabitants from the mainland of South America) used the scarcely available surface and groundwater for their drinking water supply. In the rainy seasons rainwater is collected in the dry stream beds and in the colonial-period houses were built with cisterns to effectively collect rainwater. In those days peeled off cactus plants were applied as a natural coagulation treatment of the muddy surface water to improve its quality as drinking water. The first application of the seawater desalination technology started already in the period of 1903 to 1917 for the production of process water for the Gold Mining Company. Commercial desalination however started in 1932, with the beginning of the booming economy era due to industrialization and further on with the increasing tourism. Since then seawater desalination became the most import source for water augmentation especially for the production of drinking water and industrial water. The desalination activities in Aruba have followed the desalination development trend in the world. Since the early desalination years till recently the thermal desalination (the Multi Effect Distillation and the Multi Stage Flashing evaporation) was the main dominating desalination technology. In 2008, their desalination supremacy had been taken over by the nowadays more energy efficient Seawater Reverse Osmosis membrane technology. Freshwater produced by seawater desalination is very pure and re-mineralization and addition of effective corrosion inhibitors are very important for the conditioning of drinking water. In Aruba natural dissolution of fossilized coral stones and addition of polyphosphates were always used for the post treatment to mitigate iron and copper corrosion causing brown water and blue water in the water distribution network. This paper outlines the important history of drinking water supply in Aruba from primitive treatment and supply toward seawater desalination for the reliable production of fresh water and will also elaborate on the effective post physicochemical conditioning of one of the world's highest chemical and bacteriological quality drinking water. The high quality drinking water and good maintenance of the distribution system resulted in a low percentage of Non-Revenue Water and a low Infrastructure Leakage Index. The subject discussed in this paper may be beneficial for Small Islands Developing States with limited fresh water resources to consider the application of seawater desalination for their freshwater augmentation and to effectively reduce the water losses in the distribution system which is very important for cost effective drinking water management.

Keywords: Seawater Desalination, Drinking Water Conditioning, Non-Revenue Water, Infrastructure Leakage Index.

Resumen

Aruba, una de las islas Caribeñas Neerlandesas con un clima semiárido, prácticamente no tiene recursos naturales de agua dulce. Está geográficamente ubicada aproximadamente a 20 millas al norte de la costa de la Península de Paraguaná de Venezuela. En la era preindustrial, anterior a la desalinización del agua de mar, la pequeña población (principalmente inmigrantes indígenas del continente de América del Sur) utilizaba la escasa agua superficial disponible y el agua subterránea para su suministro de agua potable. En las estaciones lluviosas, el agua de lluvia se recogía en los lechos de arroyos secos y en el período colonial se construyeron casas con cisternas para recoger efectivamente el agua de lluvia. En aquellos días, las plantas de cactus peladas se aplicaban como un tratamiento de coagulación natural del agua superficial fangosa para mejorar su calidad como agua potable. La primera aplicación de la tecnología de desalinización de agua de mar comenzó ya en el período de 1903 a 1917 para la producción de agua de proceso para la Compañía Minera de Oro. La desalinización comercial comenzó sin embargo en 1932, al comienzo de la era de la economía en auge, debido a la industrialización y más adelante con el creciente turismo. Desde entonces, la desalinización de agua de mar se convirtió en la fuente más importante para el aumento de agua, especialmente para la producción de agua potable y agua industrial. Las actividades de desalinización en Aruba han seguido la tendencia de desarrollo de la desalinización en el mundo. Desde los primeros años de desalinización hasta hace poco, la desalinización térmica (la Destilación Múltiple Efecto y la evaporación Flash Múltiple Etapa) fue la tecnología principal de desalinización. En 2008 su supremacía de desalinización había sido asumida por la tecnología de membrana, Osmosis Inversa de agua de mar, que

1 UNESCO Chair Sustainable Water Technology and Management, Faculty of Engineering, University of Curaçao Dr. Moises Da Costa Gomez, Curaçao, telephone: (297) 5945644; email: f.marchena@uoc.cw

2 Chair Technology Innovation and Risk Management, University of Twente, The Netherlands, telephone (3153) 4893934; email: J.I.M.Halman@ctw.utwente.nl

es energéticamente más eficiente hoy en día. El agua dulce producida por la desalinización del agua de mar es muy pura y la re-mineralización y la adición de inhibidores de corrosión efectivos son muy importantes para el acondicionamiento del agua potable. En Aruba la disolución natural de las piedras de coral fosilizadas y la adición de poli-fosfatos se utilizaron siempre para el post tratamiento para mitigar la corrosión del hierro y del cobre causando agua marrón y agua azul en la red de distribución de agua. Este artículo destaca la importante historia del suministro de agua potable en Aruba desde el tratamiento y suministro primitivos hasta la desalinización de agua de mar para la producción confiable de agua dulce, y también tratará el post-acondicionamiento físico-químico efectivo de una de las aguas de calidad química y bacteriológica más altas del mundo. El agua potable de alta calidad y el buen mantenimiento del sistema de distribución dieron como resultado un bajo porcentaje de Agua no Contabilizada y un bajo Índice de Fugas en Infraestructura. El tema tratado en este artículo puede ser beneficioso para los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo con recursos limitados de agua dulce para considerar la aplicación de la desalación de agua de mar para su aumento de suministro de agua potable y reducir eficazmente las pérdidas de agua en el sistema de distribución, lo cual es muy importante para una gestión costo-efectiva de agua potable.

Palabras clave: Desalinización de Agua de Mar, Acondicionamiento de Agua Potable, Agua No Contabilizada, Índice de Fugas en Infraestructura.

1. INTRODUCTION

Water is a fundamental necessity of life for all known life forms on Earth and is with food the primary needs of men. It is therefore not surprising that men have always looked for ways to desalinate brackish water or seawater to produce drinking water in arid areas. The desalination of seawater has given an enormous boost to the economic development of the Island of Aruba. This leeward Dutch island, in former times denoted as "*Isla Inútil*" (useless island) by the Spanish Conquistadores, has developed as a prosperous island since then primarily due to the availability of a trustworthy production of drinking water and industrial water, supporting the flourishing tourism industry and other industrial activities. Also, Aruba has contributed with its more than eighty five years' experience in seawater desalination to the further development and improvement of the desalination technology. The applied technologies have been adapted and improved during the years by the manufacturers through the important input gained on the island from the experienced and knowledgeable operations and maintenance personnel of the water production company. Actually, Aruba was in the late 1950s for a very short period of time the largest producer of drinking water using the seawater multi effect desalination technology. The first place is now taken over by countries such as Israel and Oman Sur in the Middle East and Australia with their desalination capacity of more than 500 000 m³/day.

Aruba has assured its population during the years the hundred percent security of continuous availability of drinking water of both chemical and bacteriological high quality because of a trustworthy efficient production, distribution and storage of drinking water. It is a small semi-arid island in the sub-tropical Caribbean Region with practically no natural resources of drinking water that still is considered in the world as a role model for the effective solution of the water shortage problem for its population. In this article a short description is given of the water supply and water treatment prior to the desalination period, the desalination history and the actual production

capacity and process and the conditioning and quality of the drinking water in Aruba.

2. METHODOLOGY

In this paper the important history of drinking water supply in Aruba from primitive treatment and supply toward the sophisticated seawater desalination technology for the reliable production of fresh water will be outlined. This paper will also elaborate on the effective post physicochemical treatment including the natural re-mineralization process with fossilized coral stones and the addition of polyphosphates for the optimal conditioning of one of the world's highest chemical and bacteriological quality drinking water.

2.1. The history of the drinking water supply of Aruba

2.1.1 Drinking water supply before Seawater Desalination

Aruba is one of the six Dutch Islands in the Caribbean Region situated approximately 20 miles off the northern coast of the Paraguaná Peninsula, Venezuela. They are very small semi-arid Islands with practically no surface water and insufficient groundwater, therefore no wonder that they were characterized as unworthy islands centuries ago by the Spanish Conquistadores. As a result of the unavailability of natural fresh water resources, for many decades seawater desalination has been for these islands the only reliable source of drinking water supply. Prior to the period of seawater desalination the source of drinking water for the small population of Aruba was rainwater collected in the dry ephemeral streams and natural water catching areas (Marchena, 2013). Although heavy rainfall in the rain season from August to February, practically most of the rainwater that reaches the ground flows back to the sea through these ephemeral streams. The collected surface water is used in the household and for small-scale husbandry activities.

In the rain season the surface water can be abundant but nevertheless in the dry season the available surface water is very little due to evaporation and absorption by the porous ground layers. The rainwater

that flows through the porous ground layers are collected in underground aquifers and in underground channels forming the so called underground rivers. At the north east coast of Aruba there is a very small creek with a constant stream of clear water the whole year. This is in contrast with the ephemeral streams, where water flows only after days of heavy rain fall. The water of this creek was used for a long time as water supply by a group of Chinese families for their commercial horticulture growing special Chinese vegetables.

At different places on the island wells were dug usually by hands using small cold chisels and hammer to collect groundwater. The depth of these wells can vary from some 6 feet near the coast line to more than hundred feet land inward. The groundwater has a high hardness due to dissolution of minerals and calcium carbonates during the absorption process in the porous layers. The *Total Dissolved Salts* (TDS) concentration of well water of Aruba is in the range of 1 000 - 12 000 ppm (parts per million). Especially in

the coastal area the TDS can be much higher due to seawater infiltration. The well water is pulled up with a wooden bucket tied up to a rope either manually or with wooden winches in bygone days. Later on, wind mills of wooden or metal framework were installed to pump the water to the surface.

The first population of Aruba consisted of Arawak Indians (particularly aboriginal emigrants of the mainland of South America), nomads that stayed only for a short period of time at places where enough food and water could be found and after a while they moved on. It is also known that they dig little holes near the beaches and dish up the natural filtered seawater as drinking water. They only build temporary little cabins made of tree branches and leaves. In the later colonial period houses of clay or stones were built with cisterns to collect rainwater from the roofs. The rainwater collected in cisterns was mainly used in households and gardening. Figure 1 illustrates the different historical freshwater supplies in Aruba.

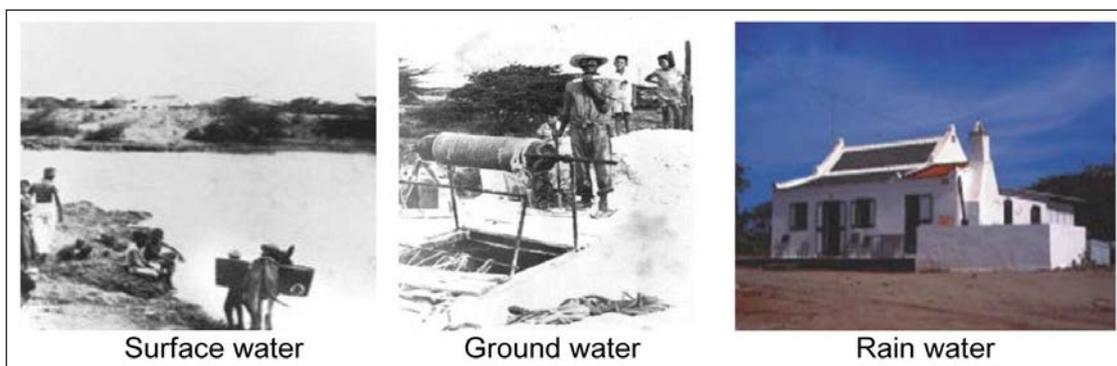


Figure 1. The historical water supply of Aruba

The rainwater flowing over the ground end up very contaminated and saturated with suspended sand particles picked up during their transport to the natural catching areas. Large particles settle down after some time on the bottom but smaller particles will stay in colloidal solution given the water a brownish muddy color. In those days already some primitive ways of water treatment were practiced to clear the drinking water.

Suspended particles were filtered out of the water in a lime stone jar and some form of water cooling was also achieved due to natural evaporation of water in a jar made of clay. The low heat transfer of the clay further helps to keep the water cool. To further clarify surface water, cactus juice or dried cactus pulp was used in a primitive coagulation, flocculation and sedimentation process to remove colloidal particles.

Also a little bit of seawater was used. A piece of iron was used to mineralize rainwater in the cisterns. It so happened that the soft rainwater was hardened by the leaching out process of the calcite mortar of the cisterns. There is no indication that the piece of iron, heated by the sun or in any other way was used to

disinfect the cistern water, a technique already used about 2000 years B.C. in India (Marchena, 2013).

It is also worth to mention that in the time of the Lago Oil Refinery (1929-1985) a modern underground rainwater catching basin with water distribution system was constructed for the purpose of gardening water supply for the refinery employee's houses at the Lago Colony located at the east coast of Aruba.

2.1.2 The first commercial drinking water distribution of Aruba

In the period of 1900 to 1914 the first water distribution network was in operation by a private company for the supply of drinking water. Groundwater was delivered as drinking water without prior treatment to the ships in the harbor and for the inhabitants of the capital Oranjestad of Aruba. With wooden wind mills, as shown in Figure 2, groundwater from wells was pumped in the distribution pipelines. Figure 2 also shows the remains of a water reservoir of the company built with stones (Stichting Rancho, 2015).



Figure 2. Groundwater distribution in 1900 to 1914

In that time, a client only paid about 75 cents for a water connection and the amount of water for consumption was not restricted.

2.1.2 The Desalination History of Aruba

The desalination history of Aruba started more than hundred years ago with the production of process water around 1903 at the Gold Mining Company (1899-1916) for the coal fired steam engines. Already in that period it was obvious that available groundwater and rainwater to be insufficient for the production of steam and for the high consumption of process water by the physicochemical gold extraction process. Boiling of saline groundwater also caused

serious scaling problems in the boilers that resulted in explosions.

The decision was then made to desalinate the seawater of the nearby Spanish lagoon (Walhain, 2005). Figure 3 illustrates a picture taken around 1911 of the Gold Mining Company and a picture of the construction of single stage evaporators with the so called serpentine heating coils in a construction place of the WEIR Company in Scotland around 1912. This type of evaporators was commonly used for seawater desalination at the end of the nineteenth century and at the beginning of the twentieth century (Birkett *et al.*, 2012). The Gold Mining Company was closed at the beginning of the First World War because the export of chemicals and dynamite to Aruba was stopped.

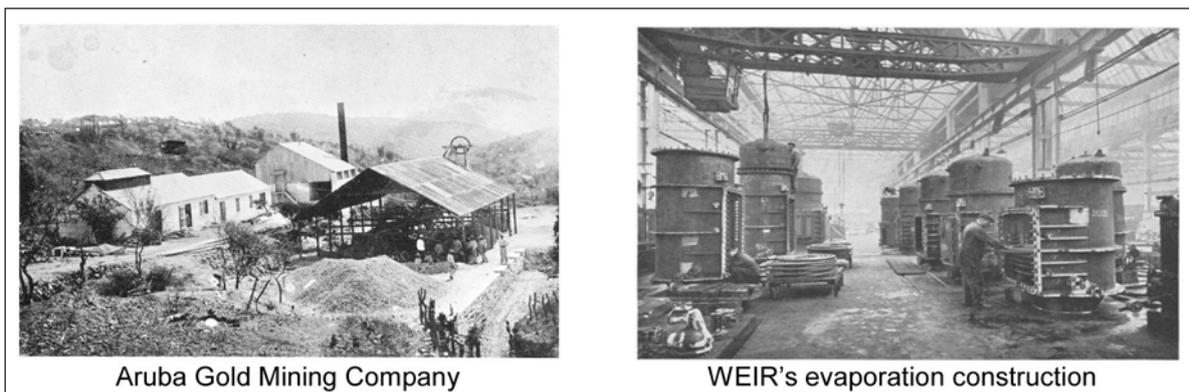


Figure 3. Aruba's early desalination (1903-1916)

The Water and Power Company of Aruba, WEB Aruba, has been producing drinking water for the island of Aruba since 1932 and industrial water since 1958 for boiler water for the Power House and process water for the Oil Refinery. In the period of 1932 to 1983, the WEIR submerged tubes *Multi Effect Desalination* (MED) technology was used for thermal desalination to produce drinking water and industrial water. The first installed evaporators had a capacity of 200 m³/day and a *Gain Output*

Ratio (GOR), the ratio of mt (metric tons) produced distillate and mt of steam consumed, of about 2. From 1932 to 1958, ten 200 m³/day evaporators were installed and stayed in production for 13 to 25 years. In 1958, the beginning of combined power and water production was initiated. Five MED evaporators with a capacity of 2,000 m³/day and GOR of about 5 to 6 were installed. Low pressure waste steam of the back pressure turbines of the Power House was used as heating steam for the

MED evaporators. These evaporators stayed in production for 25 years and were demolished in 1983. In Figure 4 the submerged tube Weir MED

evaporators are illustrated. The total water produced with the MED technology was about 55.3 million m³ (14,607 million US gal).

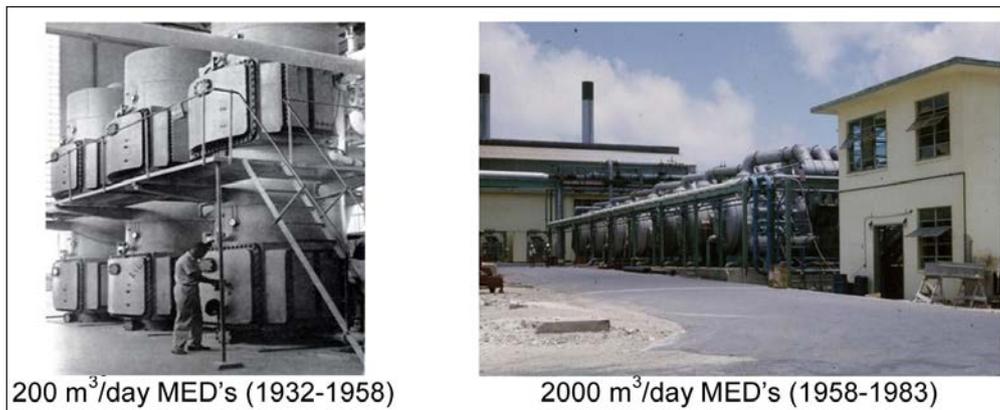


Figure 4. Weir MED evaporators from 1932 to 1983

As already mentioned in the introduction, in the MED desalination era Aruba was for a short period of time the largest seawater desalination country in the world, in 1959, until the introduction of the large capacity *Multi Stage Flashing* (MSF) evaporators in the Middle East, especially Kuwait with the exploitation of oil.

In 1965, this MSF desalination technology was also introduced at WEB Aruba with the installation of a 3 000 m³/day recirculation brine MSF evaporator from Aqua Chem Inc. (Arrindell *et al.*, 2002). This evaporator had a design GOR of 9. In the 1970s, the desalination production capacity was extended with two Aqua Chem evaporators of the second generation with a nominal capacity of 6 000 m³/day also with a GOR of 9.

These MSF evaporators stayed in operation up to 1985. In 1983 and 1984, the first two next third generation of 6 000 m³/day Aqua Chem recirculation brine MSF evaporators with a GOR of 10, Aqua Chem 1 and Aqua Chem 2 were installed closing the era of the MED evaporators. From 1978 to 1995, the vertical *Multi Stage Controlled Flashing* (MSCF) evaporators were used. This revolutionary Dutch-Hungarian design with the usage of chlorine gas for

the control of marine biofouling in the condensers was intended to increase flash evaporation efficiency and to decrease operational cost. However it turned out to be a failure.

These aluminum evaporators had poor performance and were susceptible for corrosion. With the poor operation experience with these Aquanova evaporators fresh in mind and a short time to evaluate proven new technology the choice was made to continue installing Aqua Chem MSF evaporators to cope with the fast increasing water demand due to fast economic growth in the 1990's. In Figure 5 the pictures of the Aqua Chem and the Aquanova MSF evaporators are shown. During the period 1990 to 1998, WEB Aruba was forced due to rapid economic growth, to increase production capacity with new MSF evaporators each of three successive years: Aqua Chem 3 in 1990, Aqua Chem 4 in 1991 and Aqua Chem 5 in 1993. Two additional MSF evaporators were built in two three-year period namely Aqua Chem 6 in 1995 and Aqua Chem 7 in 1998. As mentioned before, MSF technology was chosen because of reliability, good operation experience and lack of time to evaluate new technology (Marchena, 2013).

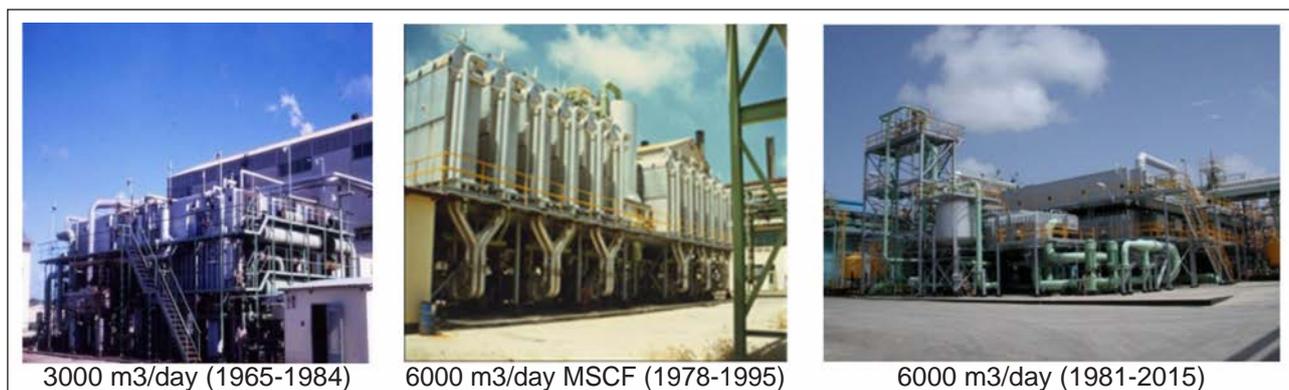


Figure 5. Multi Stage Flashing technology from 1965 to 2015

In 1982, 1983 and 1990 WEB Aruba had experienced problems with sufficient water production capacity mainly due to aging of MED evaporators, poor operation of the existing Aquanova evaporators and delay in the installation planning of the new Aquanova evaporators. To cope with the increasing demand, drinking water was imported in 1982, 1983 and 1990 from the United States, Venezuela and the Island of Dominica.

The quantity of imported water is as follows:

- 1982: 41,918 m³; from Rio Caroni, Venezuela
- 1983: 741,122 m³; from the Hudson River, New York
- 1990: 252,115 m³; from the Hudson River, New York and from the island of Dominica.

The cost of import water was very high and to reduce water cost, WEB Aruba contracted Geveke B.V. to install a 1,000 m³/day *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) production unit in 1983 on a *Build Own and Operate* (BOO) contract basis to minimize import of water. This *Plate and Frame* (PF) SWRO production unit stayed in operation from 1983 to 1985. There were a lot of membrane biofouling problems and this SWRO production unit never had an optimal operation. The total amount of water produced with this SWRO production unit, during the whole period, was 257 543 m³. In Figure 6 pictures of this SWRO production unit are illustrated (Marchena, 2013).

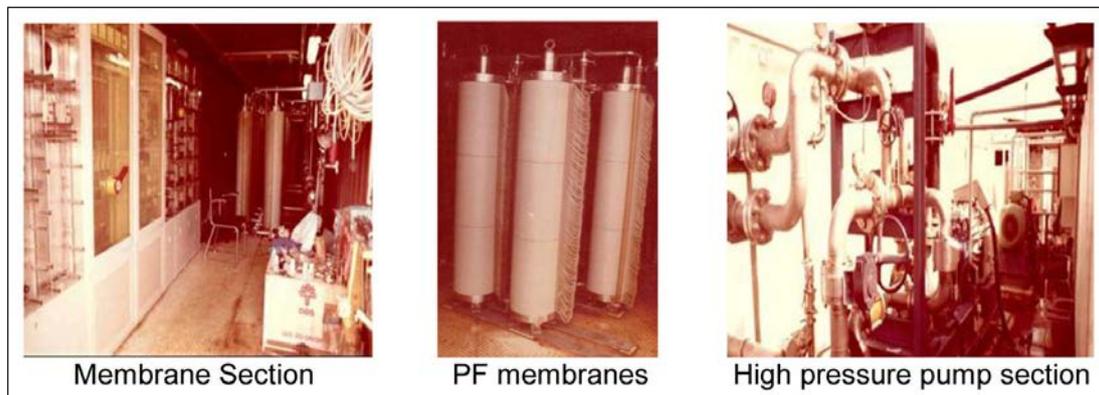


Figure 6. The 1 000 m³/day BOO SWRO from 1983 to 1985

2.1.3. Current Production and Process of WEB Aruba; the membrane technology

Ironically the SWRO technology, which was put out of the picture in 1985 with commissioning back then of the supreme MSF technology closing the era of MED technology has now pushed the MSF technology out of the desalination activities of Aruba. In March 2008 a new 8 000 m³/day SWRO production unit constructed by GE Ionics went in operation. It is a three trains-two pass RO consisting of a SWRO and a two-stage *Brackish Water Reverse Osmosis* (BWRO) with an overall design recovery of 39.5% and an energy consumption ratio of 4.00 kWh/m³. The Aqua Chem evaporator constructed in 1983 was taken out of production in June 2008 for economic reasons after more than 25 years in service and still in excellent operation condition. In the last quarter of 2012 the second SWRO with a nominal capacity of 25 500 m³/

day constructed by Veolia VWS went in operation. It is a two pass RO consisting of four SWRO trains and two trains of a two-stage BWRO unit with an overall recovery rate of 43.2% and a nominal energy consumption ratio of 3.75 kWh/m³. The two SWRO units produce high quality product water with a TDS of about 15 ppm. As a consequence four of the existing MSF evaporators have been put out of production. In the second quarter of 2015, SWRO mobile units rating 12 000 m³/day replaced the remaining two MSF evaporators. These mobile units under a BOO contract with GE WPT is a transition phase toward the installation of the third SWRO unit. Additionally the new *Electro Deionization* (EDI-) membrane technology rating 4 500 m³/day was introduced for the production of very pure industrial water so totally banning the MSF technology from the desalination activities in Aruba. In Figure 7 the new membrane technologies are illustrated (Marchena, 2013).



Figure7. The actual desalination technology at WEB Aruba

To conclude the more than 85 years of thermal and membrane desalination history, the trend of the annual production increase since 1933, the population growth and the chronology of the desalination in Aruba is given. The annual water production has increased from 0.01 million m³ in 1933 to 13.49 million m³ per end of December 2016. In the period 1958-1980 and after 1985, the water demand

has increased rapidly respectively due to industrial water delivery to the Lago Oil Refinery in 1958, the rapid economic growth and the reopening of the oil refinery in 1985 (Marchena, 2013). In Figure 8 the annual water production from 1933 to 2016 and the production of the different desalination technologies are shown. The decrease in 2010 is due to the shut-down of the oil refinery.

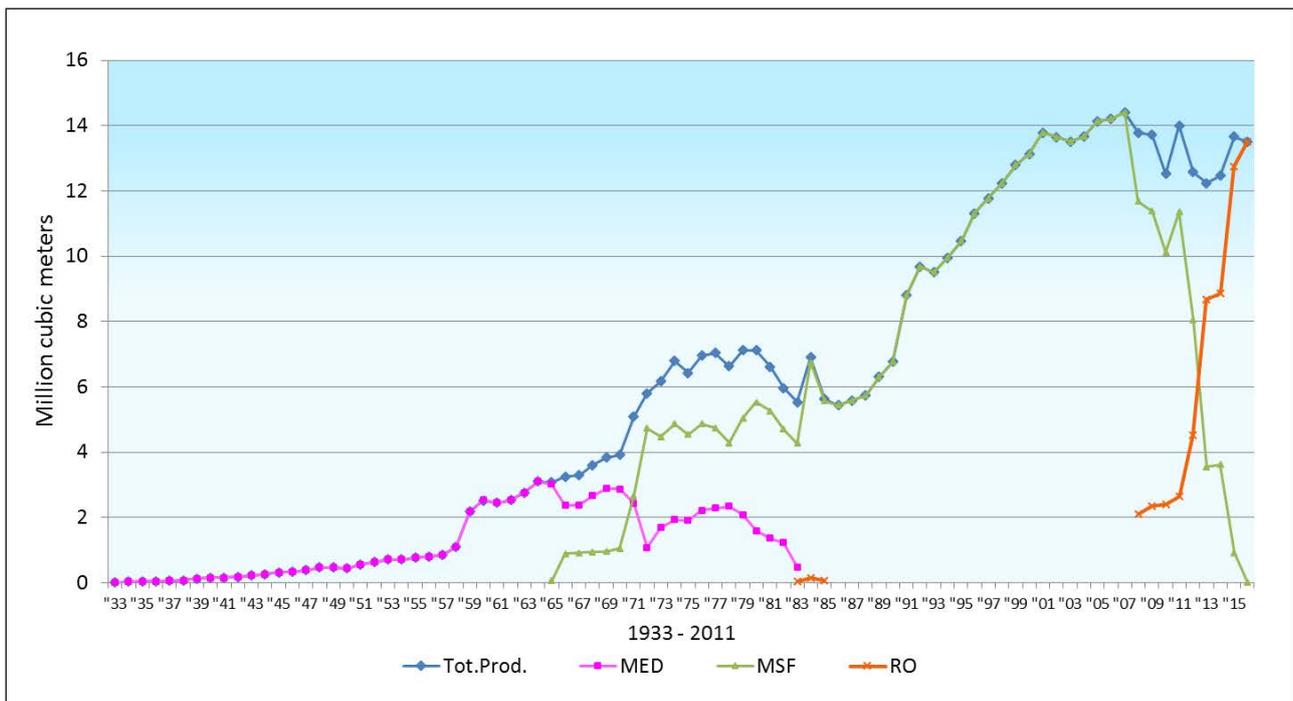


Figure 8. Total annual water production since 1933 including the production of MED, MSF and SWRO

Since the opening of the Lago oil refinery in 1929 the population of Aruba has increased rapidly with a steep increase in the 1990 due to rapid growth in

the tourism industry. As a comparison for the water production trend the population growth of Aruba since 1803 is shown in Figure 9.

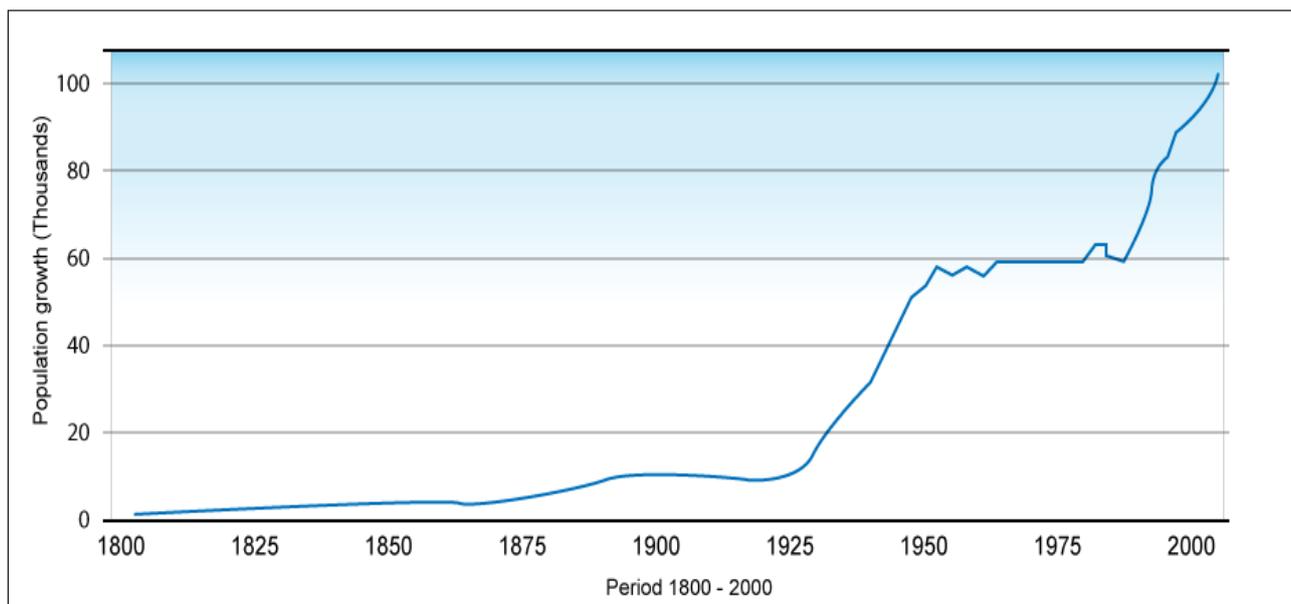


Figure 9. The growth of the population of Aruba since 1803

As can be seen the two graphs show a similar trend. Furthermore, in conclusion the chronology of the desalination in Aruba is given in Table 1.

Table 1. The chronology of seawater desalination in Aruba

Desalination unit	Technology	Design capacity (m ³ /day)	Year of star up	Out of service	
				in	after
10 Weir	submerged tube MED	200	1933-1945	1958	
5 Weir	submerged tube MED	2000	1958	1983	25 years
1 Aqua Chem	long tube MSF	3000	1965	1984	19 years
1 Aqua Chem	long tube MSF	6000	1970	1984	14 years
1 Aqua Nova	vertical MSF CFE	4000	1978	1983	5 years
1 Aqua Nova	vertical MSF CFE	4000	1980	1985	5 years
1 Aqua Chem (AC#1)	long tube MSF	6000	1983	2008	25 years
1 Aqua Nova	vertical MSF CFE	3700	1983	1991	8 years
1 Aqua Nova	vertical MSF CFE	6000	1984	1995	11 years
1 Aqua Chem (AC#2)	long tube MSF	6000	1984	2013	29 years
1 Aqua Chem (AC#3)	long tube MSF	6000	1990	2013	23 years
1 Aqua Chem (AC#4)	long tube MSF	6000	1991	2013	22 years
1 Aqua Chem (AC#5)	long tube MSF	6000	1992	2015	23 years
1 Aqua Chem (AC#6)	long tube MSF	6000	1995	2015	20 years
1 Aqua Chem (AC#7)	long tube MSF	6000	1998	2015	17 years
1 GE Ionics (SWRO#1)	2 pass-2 stage SWRO	8000	2008		
1 Veolia (SWRO#2)	2 pass-2 stage SWRO	25500	Dec 2012		
1 GE Mobile SWRO	2 pass-2 stage SWRO	6000	Mar 2015		
	2 pass-2 stage SWRO	6000	Apr 2015		
1 GE EDI unit	(industrial Water)	4500	Apr 2015		

2.2. The drinking water conditioning, quality control and assurance

2.2.1. Addition of calcium and alkalinity in the Coral House

Since the start of the desalination activities in 1932 in Aruba until mid-2007, WEB Aruba produces distilled water, which is adjusted to approximately 12 mg/L total hardness, 12 mg/L alkalinity, and pH

8.8-9.3 by cascading it down over a bed of natural crushed fossilized coral stones, as shown in figure 10. The coral stone serves as an economical source of calcium carbonate (lime stone) which dissolves at a controlled rate, raising the pH above neutral and imparting some calcium (hardness) and carbonate/bicarbonate buffering (alkalinity) to the water before it enters the distribution piping (Post *et al.*, 2002).

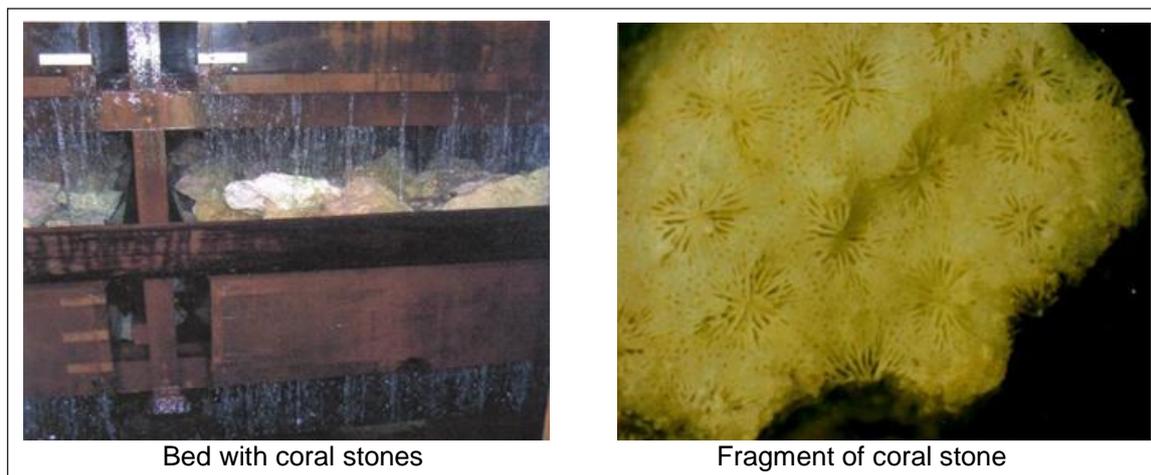


Figure 10. Distillate Re-mineralization in the Coral House

Elemental analysis by Betz Laboratories in 1990s of a fragment of used coral stones, as shown in figure 10, indicate that it contains about 96.2% calcium (Ca), 1.4% magnesium (Mg) and minor amounts of sulfur (S), aluminum (Al) and Iron (Fe). The analyses were performed with *Scanning Electron Microscopy* (SEM) and *Energy Dispersive X-ray Analysis* (EDXA) (Post *et al.*, 2002). In 2007, the Coral House was replaced by a modern automated re-mineralization pressurized lime stone fixed bed system especially to increase the biological integrity of the re-mineralization process eliminating the free aeration process of the distillate in the Coral House. This reduces the possibility to induce air-born *Legionella pneumophila* bacteria contamination of the drinking water. Especially warm water in sub-tropical distribution systems might enhance *Legionella* growth increasing potential health risks (Van der Kooij *et al.*, 2005). Both the MSF distillate and the SWRO product water (after carbon dioxide, CO₂ injection) although acidic with a pH in the range of 6.3 to 6.7 still contains low CO₂ concentrations. Thus the natural dissolution of calcium carbonate enhanced by carbon dioxide remains very low. Compared to natural surface water and well waters in most areas of the world and hard water (hardened distilled water with CO₂ enhanced lime stone re-mineralization as in the neighboring Dutch Caribbean Islands) the resulting water as it leaves the coral beds is still relatively soft (low hardness) with a comparatively low alkalinity and an alkaline pH.

2.2.2. Chemical treatment before 1990 and in the period 1990 to 1995

Although the calcium, alkalinity and pH elevation provided by the Coral House reduced corrosivity of the water, it was still relatively aggressive to the piping, so corrosion inhibitors were used to further reduce corrosion. Prior to 1990, sodium hexametaphosphate alone was used to inhibit corrosion. The hexametaphosphate is a cathodic inhibitor that forms a protective film on the steel surface. Hexametaphosphate has some iron sequestering capabilities which help it to reduce brown water complaints, but not as strong as other polyphosphates. Further it has also the capability to sequester calcium ions reducing the film forming potential for corrosion inhibition. The concentration of iron in the drinking water exceeded 0.5 mg/l, which is above the *World Health Organization* (WHO) guidelines for iron of 0.3 mg/L (Marchena, 2013). Alternative treatment programs were evaluated to further reduce corrosion and iron concentration (Post *et al.*, 2002). In 1990, WEB Aruba replaced the hexametaphosphate-based program with a multifunctional program. Pyrophosphate replaced hexametaphosphate to take advantage of its superior iron sequestering capabilities to slowly clean up the piping system and eliminate the brown water complaints. A very low level of zinc, an excellent corrosion inhibitor for low hardness water, also supplemented the pyrophosphate (Post *et al.*, 2002). As shown in Figure 11, the change

in treatment program significantly reduced iron levels from 0.67 mg/L in 1990 to 0.05 mg/L in 1995 well within WHO guidelines for iron. The point was reached when the bulk of the iron corrosion products had been removed from the system and the treatment was shifted toward eliminating the

production of the iron in the system. A portion of the pyrophosphate was replaced with orthophosphate, which is both an anodic and cathodic inhibitor and more cost-effective. This was done by replacing the single component zinc product with a blended liquid product containing zinc and orthophosphate.

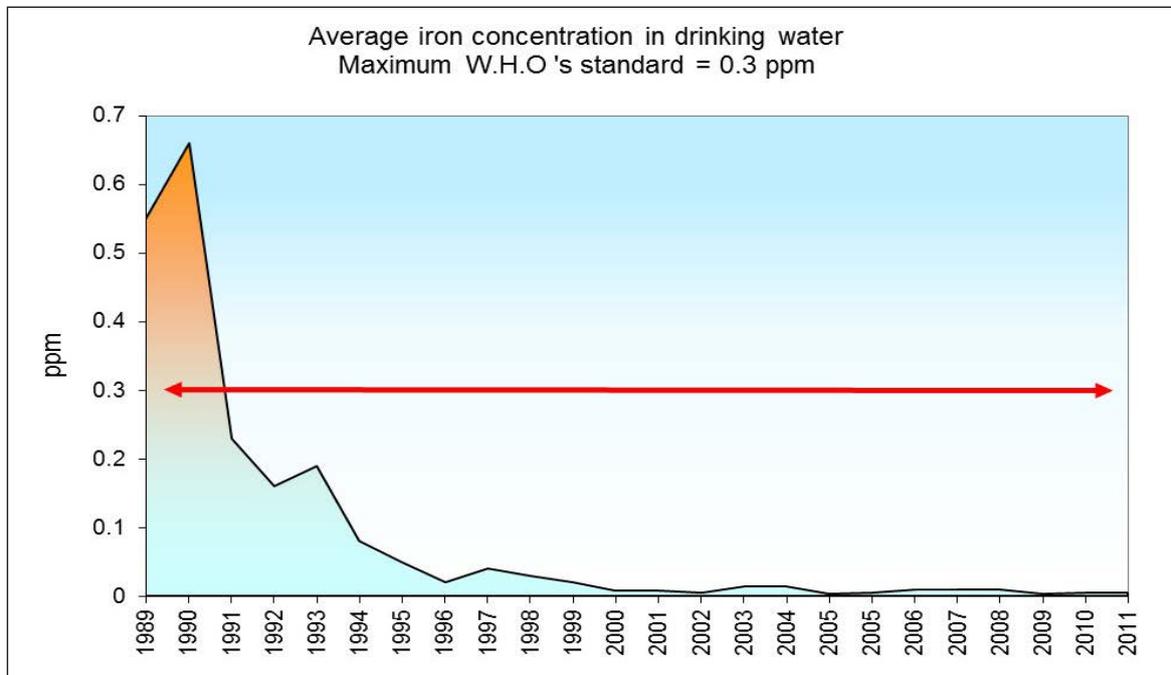


Figure 11. Effective reduction of the iron corrosion in the drinking water

2.2.3. Chemical treatment from 1996 to date

The current treatment program consisting of 0.2 mg/L of zinc (as Zn), 0.6 mg/L of orthophosphate (as PO_4) and 0.5 mg/L of pyrophosphate (as PO_4) has reduced the iron levels to approximately 0.01 ppm, a reduction of nearly 99% from levels prior to the changes in the treatment program. Since the introduction of the pyrophosphate/zinc orthophosphate corrosion inhibition program in 1990 no occurrence of brown water in the distribution system has been reported.

After the chemical post treatment system the drinking water is pumped to 6 water storage tanks with a capacity of 12,300 m³ each. The water tanks serve as a buffer for the desalination process. Further on the island there are water tanks installed with a total capacity of 65 393 m³. For further quality improvement and to guarantee a biological high quality drinking water, Berson in line UV-equipment

were installed since 2001 in all of the five distribution pipelines going to the water distribution header. The UV dosage is set at 60mJ/cm² and the minimum allowed value is set at 25mJ/cm². This was never done before because of the high temperature (110 °C) drinking water production process by thermal desalination at WEB Aruba.

The industrial water is chemically treated with caustic soda at a concentration of 2 ppm to increase the pH from 6.3 to 8.7-8.9. Further sodium hexametaphosphate is dosed at concentration of 3 ppm to inhibit corrosion. After chemical treatment, the industrial water is pumped to two storage tanks both having a capacity of 12 300 m³. From the storage tanks industrial water is pumped to the Aruba Oil Refinery and to the Power House as boiler make up water. In conclusion of the chemical treatment section, the schematic and a picture of the water distribution header are illustrated in Figure 12.

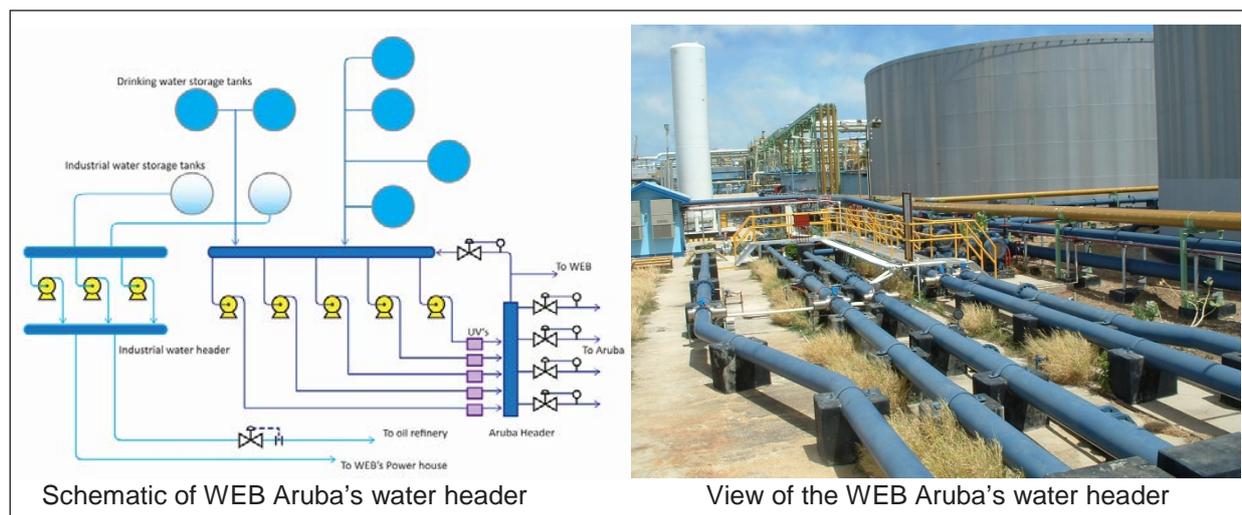


Figure 12. The WEB Aruba's water distribution header.

2.3 Some aspects of the distribution network related to drinking water quality

2.3.1. The water distribution network of Aruba

WEB Aruba is responsible for the production and distribution of high quality and safe drinking water for the population, the trade and industrial sector of Aruba and the delivery of industrial water for the Aruba Oil Refinery. The distributed drinking water in Aruba is of the very highest chemical and bacteriological quality. Chemical and bacteriological quality control and assurance is performed by respectively the Water laboratory of WEB Aruba and the Bacteriological laboratory of the Aruban Government Health Department.

In 2000 after the Legionella incident in Bovenkarspel in the Netherlands, Europe, WEB Aruba has taken proactively actions to guarantee the bacteriological quality of the drinking water (Marchena, 2013).

Aruba with a population of about 110 thousand inhabitants has a high living standard and a high developed tourism industry with more than one million yearly overnight tourists. Especially for the tourism industry, the most important economical pillar of Aruba, the hundred percent operational and delivery assurance of this high chemical and bacteriological quality drinking water is of utmost importance. According to procedure the common bacterial counts of the Aruba drinking water header before entering the water distribution system should be lower than 50 cfu/mL (colony forming units per milliliter) and especially regarding the *E-coli* and the *Legionella pneumophila* bacteria, counts should be 0cfu/mL (Marchena, 2013).

The Desalination Department makes daily a balance of the produced and distributed water. Due to the high cost of this high quality conditioned desalinated water the main objective of the Desalination and the Water

Distribution Departments of WEB Aruba is to optimally minimize the loss of drinking water. The production of well-conditioned drinking water, good operation and maintenance of the distribution network and a strict water control program objectively resulted in a very low leakage percentage due to corrosion, breakages and flushing of the dead ends. Furthermore water theft is practically non-occurring.

2.3.2. The Non-Revenue Water (NRW)

According to the *International Water Association* (IWA) standard, the *Non-Revenue Water* (NRW) is defined as the difference of the distributed water and the water sales or the total yearly distribution and the billed water sales (Lambert, 2001). The NRW accounts for water meters' errors, administrative losses such as fire water, rinse and unauthorized water consumption such as theft and leakages. Important for lowering the NRW is a water balance of the whole water distribution system making possible the detection of all components contributing to the NRW. Optimal inspection of the water distribution system, timely detection and repair of leakages contribute to lowering the water losses. The Desalination Department and the Water Distribution Division of WEB Aruba make monthly a water balance in their monthly reports and it is controlled yearly by the department of the Internal Control and by external consultants. Because of an optimal chemical conditioning of the drinking water and a good maintenance the water losses in the distribution system are very low. Figure 13 illustrates the NRW percentages of Aruba in the period 1988 to 2016. As depicted in this figure, the NRW percentages were in the period of 1988 to 1998 in the range of 13.5 to 4.7% and since 1999 in the range of 1.8 to 4.7% of the total produced water (Marchena, 2013).

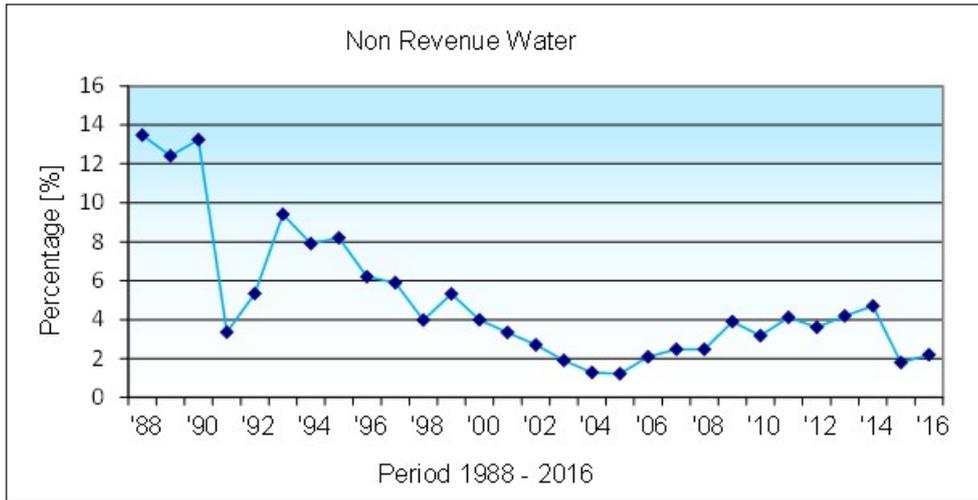


Figure13. The NRW in the period of 1988 to 2016

For comparison the NRW of the other island in the Caribbean region are illustrated in Figure 14. In general a NRW of 15-20% is considered acceptable

for a good maintained water distribution system (Marchena, 2013).

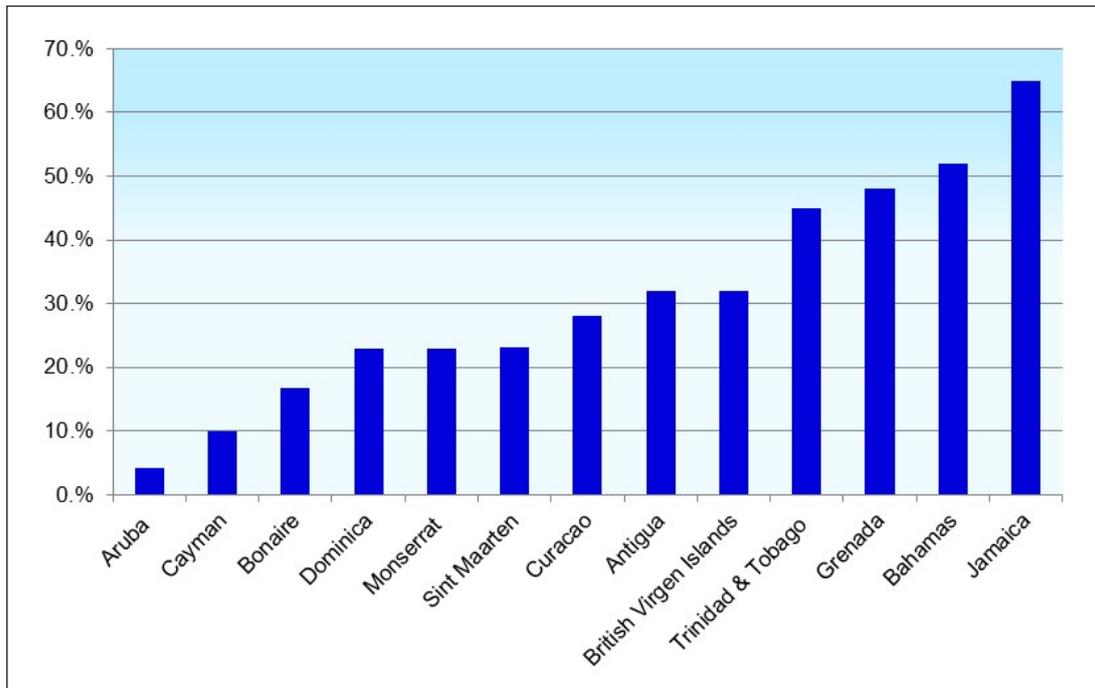


Figure 14. The NRW of some islands in the Caribbean region

As Figure 14 indicates, the NRW for most of the Caribbean islands are between 20-70%, actually outside the range for a well maintained water distribution system (Marchena, 2013).

2.3.3. The Infrastructure Leakage Index (ILI)

The NRW percentage was introduced by the International Water Association (IWA) to improve performance indicators for water distribution system. Although recognized as a better indicator it does not give any indication about the maintenance and management status of the water distribution system.

In cooperation with the American Water Works Association (AWWA) the Infrastructure Leakage Index (ILI) was introduced at the end of 1999 as a new performance indicator specifying the maintenance condition of a water distribution system (Preston et al., 2007). The ILI is the ratio of the Calculated Annual Real Losses (CARL) and the Unavoidable Annual Real Losses (UARL) and is based on the best practice water balance of IWA.

In a preliminary study in 2010, a very low ILI value of 0.51 has been calculated for the distribution system of Aruba which corresponds with the guidelines for ILI

target set forth by AWWA for systems with very costly water production and practically no natural water resources (Marchena, 2013). The value is the lowest

in comparison with the other Dutch Caribbean Islands with seawater desalination as Table 2 indicates.

Table 2. Calculated ILI value for Aruba and the Dutch Caribbean Islands with desalination

	Aruba	Curacao	Bonaire	St.Maarten
Volume Sytem input (m ³ /Yr)	13 372 149	12 580 777	1 122 221	4 835 958
Pipe length (km)	642.1	2 199.6	115.5	290
Number of service connections	28 638	49 300	9 008	4 342
Average pressure (m)	55	45	50	80
UARL (m ³ /Yr)	693 390	1 298 100	169 460	235 850
CARL (m ³ /Yr)	356 450	3 061 010	171 500	1 209 310
NRW (%)	3.0	27.5	15.4	26.6
ILI	0.51	2.36	1.01	4.76

2.4. The chemical and bacteriological quality control and assurance in the water distribution

2.4.1. The chemical water quality management

WEB Aruba maintains minimal the chemical guidelines specified by the WHO (Marchena, 2013). The Water laboratory of WEB Aruba has 26 strategically regional sample points in the water distribution network for monthly measurements of the pH, turbidity, iron and copper concentrations. The analysis results are monthly reported to Senior Management, the Aruban Government Health Department and to the Production and Water Distribution departments. A good quality control program enables proactive action to possibly needed chemical adaptation of the chemical conditioning in case of eventual occurring corrosion in certain section of the drinking water distribution network and to set up an effective flushing program. Once a year, a chemical and bacteriological quality audit is performed through a thorough water analysis by an external renowned and certified laboratory. The *Pan American Health Organization* (PAHO) is regularly invited to perform an intensive quality audit of the drinking water. According to their report the drinking water of Aruba is qualified as one of the highest chemical and bacteriological quality in the world (Muñoz Elguera, 2008).

2.4.2. The bacteriological water quality management

The Desalination and the Water Distribution Departments are in cooperation with the Water Laboratory Department responsible for the bacteriological quality control of the distributed water. The bacteriological analyses are performed independently by the Bacteriological laboratory of the Aruban Government Health Department. At the strategic sample points, the Health Department takes monthly samples in cooperation with the Distribution Department. It is mandatory that all process'

components before taken in operation either at the Production or the Distribution Department should be disinfected and bacteriological approved.

The guide line is a value lower than 50cfu/mL. Since 2000 a close work relationship is set up with Kiwa Water Research BV from the Netherlands for advice on Legionella research and monitoring program for proactive preventive measures. Legionella is a water-borne microorganism that is not harmful for normal water consumption only as inhaled in water mists containing a high concentration of the microorganism.

The genotype *Legionella pneumophila* can cause legionellosis better known as Pontiac fever (Van der Kooij *et al.* 2006). In every drinking water system worldwide water borne microorganisms form biofilm on the distribution pipe surfaces. Of importance for bacteriological control is the production and delivery of well-conditioned bio stable water not to promote further growth. Recent study showed that for Legionella to grow in the biofilms, protozoan hosts such as *Hartmannella vermiformis* should be present. These protozoans feed on the Legionella bacteria and once in the protozoa they parasitically reproduce themselves killing their hosts (Valster, 2011). It is also known that variation in pH and temperature especially trace elements have a growth enhancement effect on microorganism in the biofilm (Van der Kooij *et al.*, 2005). In this context effective conditioning of the drinking water is an aspect of major importance to guarantee the biological and chemical quality of the drinking water. The Aruba drinking water produced by thermal desalination since 1932 and with the membrane desalination since 2008 has a high bio stability that no residual chlorine is necessary to guarantee biological quality. Up to now no bacteriological regrowth has been reported in the distribution system (Marchena, 2013). Research in the Netherlands showed that even though chlorine disinfection increases drinking water

safety it poses more problems than benefits and the Dutch have gradually adopted a total drinking water system approach allowing production and distribution of biological safe drinking water without chlorine dosage (Smeets *et al.*, 2009).

2.5. The average annual water distribution and costs

The annual average water distribution is approximately 13.5 million m³. The water consumption share of the Population is 49.7%, the Hotels 23.4%, Oil Refinery 13.1%, Commercial 11.0%, Government Departments 1.9% and Aruba Ports Authority (ships) 0.9%. The water consumption of the hotels can be specified as 30% for gardening, 35% for laundry, toilets and cooling towers and 35% for potable water. The monthly domestic water consumption according to WEB Aruba’s estimation can be specified as 4 m³ (130 L/day) per person, 0.16 m³ for each cycle of was machine usage, 13 m³ for swimming pool (with a dimension of 8x4 m) and 3-12 m³ for gardening. The water consumption for a small, medium and large garden is calculated to be respectively 3 m³, 6 m³ and 12 m³, (Marchena, 2013).

Drinking- and industrial water produced by seawater desalination is very costly, especially due to the high

cost of heavy fuel oil for energy production. For client satisfaction and further to promote a good payment conduct and conscious use of water, an adequate tariff is due necessary. WEB Aruba has a socializing tariff system for house hold, a so called layer system consisting of five layers dependent on the amount of water consumed. The first three layers are based on a fixed price and the other two are based on a variable price dependent on the price of the heavy fuel oil. The first layer is a fixed price for the consumption of the first three cubic meters of water and the second layer a fixed price per consumed cubic meter for the consumption within three to six cubic meters. The third layer is the same as the second layer with a different fixed price per consumed cubic meter for the consumption between six and twelve cubic meters.

The last two layers based on variable prices are for the consumption between twelve and twenty cubic meters and for consumption higher than twenty cubic meters. For commercial and trade, construction, hotels and Government there is a fixed tariff of US\$ 5.28/m³. In the tariff all financial cost, depreciation cost, operation and maintenance cost are incorporated. Since 1992, no tariff increase has been introduced on components not related to the heavy fuel oil cost. In Table 3 the new water tariff for the water billing per August 2012 in comparison with the previous water tariff is shown (Winterdaal, 2017).

Table 3. The Water tariff of WEB Aruba as per August 2012

Customer	Monthly consumption in m3	Previous Tariff in US\$/m3	New Tariff in US\$/m3	Tariff reduction in US\$	Tariff reduction in percentage
Residential	< 3	2.53	2.53		
	4 - 6	3.00	2.53	0.47	16%
	7 - 12	4.19	3.47	0.72	17%
	13 - 20	11.17	6.25	4.92	44%
	> 20	13.44	8.47	4.97	37%
Non residential	Fixed amount/m ³	7.11	5.28	1.83	26%

The reduction in water tariff was possible due the commissioning in 2012 of the second new more efficient SWRO with a capacity of 25,500 m³/day.

Additionally, the year average sales prices and the water production cost price in the period of 2008 to 2016 are shown in Table 4 (Winterdaal, 2017).

Table 4. The year average water sales and production cost of WEB Aruba

Water year average sales and cost price in \$ per m ³									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Commercial sales price	6.20	5.12	5.96	6.56	6.41	5.32	5.32	5.32	5.30
Residential sales price	5.80	4.90	5.50	5.87	5.52	4.45	4.48	4.52	4.52
Industrial sale price	5.52	4.26	5.28	5.83	5.98	4.85	5.62	5.27	5.25
Water production cost price	4.23	4.58	5.08	5.67	5.27	4.48	4.50	3.77	3.32

As indicated in Table 4, the introduction of the more efficient membrane technology resulted in a reduction of the water production cost from US\$ 5.67 to US\$ 3.32 per cubic meter in the period of 2011 to 2016, a reduction of about 41.4%. It is noteworthy

that despite the high increase in water cost in the period of 2004 to 2010 due to the rapidly increase in the heavy fuel oil costs, the water demand per capita practically stayed constant as indicated in Figure 15 (Marchena, 2013).

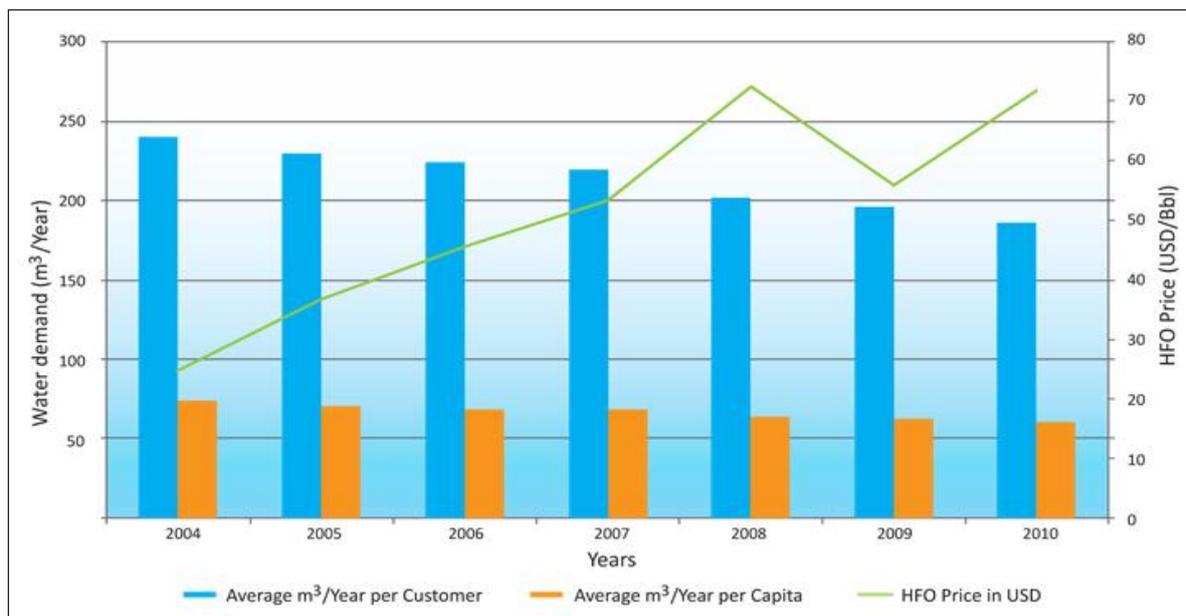


Figure 15. The domestic water demand of Aruba

3. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The desalination activities in Aruba were governed for almost 80 years by the thermal desalination and this supremacy is taken over since 2008 by the membrane technology. Throughout its desalination activities, Aruba has gained enormous operation experiences that contributed to the improvements of the desalination technology due to continuously seeking to improve efficiency and application of well proven new technology. According to Pan American Health Organization, the drinking water of Aruba produced by seawater desalination with the thermal and membrane technology is of high chemical and bacteriological quality (Muñoz Elguera, 2008).

WEB Aruba, the water company, has succeeded due to the optimal corrosion inhibition program of the drinking water, good operation and maintenance of the water distribution system to obtain low NRW values in the range of 1.8-4.7% and an ILI value of 0.51, the lowest value in the Caribbean Region (Marchena, 2013). This paper has outlined an important desalination history for drinking water augmentation and the main conclusion is that the Island of Aruba took a journey from primitive water treatment and supply to successful sophisticated water production and distribution and still gives its population the security of reliable healthy drinking water thanks to the seawater desalination technology. However, and despite many innovation and efficiency improvement in seawater desalination, the cost of

the produced drinking water is still very high mainly due to the high cost of the heavy fuel oil to produce the needed energy. WEB Aruba's biggest challenge in seawater desalination in the very near future is to increase its application of alternative energy such as wind energy and solar energy on a larger scale reducing fossil fuel toward cost effective and sustainable seawater desalination. Furthermore, evaluation of an effective energy and water demand side management to optimize daily water and power production with alternative sustainable energy may also result in effectively seawater desalination's cost reduction.

4. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Management Team of WEB Aruba for permission granted to use the company's information for this paper. Further the authors would like to thank Mr. Nelson Thiel of the National Archive of Aruba for the historical pictures of Aruba and Mr. Vincentico R. J. Vrolijk of the Water Production Department for his support with the graphs.

4. REFERENCES

Arrindell, E. M., J. D. Birkett. 2002. Aruba's Early Experiences in Desalination. Caribbean Desalination Conference, Oranjestad, Aruba.

- Birkett, J. D., F. A. Marchena. 2012. Early Desalination in the Caribbean and its Adoption in the Netherlands Antilles. CaribDA Conference & Exposition, Oranjestad, Aruba.
- Lambert, A. O. 2001. International Report on Water Losses Management and Techniques. Report to IWA Berlin Congress. Berlin, Germany, 22 p.
- Marchena, F. A. 2013. Efficiency Improvement of Seawater Desalination Processes: The case of the WEB Aruba NV on the Island of Aruba. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 522 p.
- Muñoz Elguera, A. 2008. Assessment of Water Quality Monitoring and Control in Aruba and Recommendations for Health Risk Reduction, PAHO/OMS Report.
- Post, R. E., F. A. Marchena, D. R. Maria & E. F. H. Delannoy. 2002. Water Treatment Technology for Desalination Systems-A decade of experience inhibiting corrosion and "red water" in drinking water systems. Caribbean Desalination Conference, Oranjestad, Aruba. 29 p.
- Preston, S. J., R. Sturm. 2007. Understanding the Components of your Infrastructure Leakage Index (ILI) is necessary strategy to reduce the overall ILI value-especially in systems with a low ILI. http://www.waterloss2007.com/pdf_vortraege/Mittwoch/B8-1.pdf.
- Smeets, P. M. W. H., G. J. Medema & J. C. van Dijk. 2009. The Dutch Secret: how to provide safe drinking water without chlorine in the Netherlands. *Drink Water Eng. Sci.*, 2: 1-14.
- Stichting Racho. 01/08/2015. <http://www.stichtingrancho.org/lina-di-tempo-di-rancho/>
- Valster, R. M. 2011. Free-living protozoa in drinking water supplies, Community composition and role as hosts for Legionella pneumophila in Potable Water. PhD Thesis, University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands, 178 p.
- Van der Kooij, D., H. R. Veenendaal & W. J. H. Scheffer. 2005. Biofilm formation and multiplication of Legionella in a model warm water systems with pipes of copper, stainless steel and cross-linked polyethylene. *Water Research* 39: 2789-2798.
- Van der Kooij, D., B. A. Wullings. 2006. Occurrence and Genetic Diversity of Uncultured Legionella spp. in Drinking Water treated at Temperatures below 15 °C. *Applied and Environmental Microbiology*:157-166.
- Walhain, J. H. M. 2005. Oro Ubao: a study of the gold mining in Aruba, (in Dutch). Unoca, Oranjestad, Aruba, 56 p.
- Winterdaal, E. O. L. 2017. Department of Financial and Economic Affairs, W.E.B. Aruba N.V.

CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL SECTOR CENTRO OCCIDENTAL DEL MUNICIPIO MIRANDA (ESTADO ZULIA, VENEZUELA)

GROUNDWATER'S QUALITY IN WEST CENTRAL SECTOR OF MIRANDA MUNICIPALITY (ZULIA STATE, VENEZUELA)

Gutiérrez, Janet¹, Marín, Julio¹, Paris, Marta²

Resumen:

Desde hace pocos años los organismos competentes en Venezuela han iniciado la evaluación de los acuíferos subterráneos, para conocer la cantidad y calidad del agua disponible. Sin embargo, en muchas regiones remotas del país no existe información alguna con relación a estas fuentes de abastecimiento. El objetivo de este trabajo consistió en describir la calidad del agua de 32 pozos profundos del sector centros occidentales del municipio Miranda del estado Zulia (Venezuela), destinados a uso doméstico y/o riego. Se realizaron tres muestreos con una frecuencia de dos meses, incluyendo pozos comunitarios (público) y de uso privado. Se analizaron los siguientes parámetros de acuerdo con los métodos estándares: pH, color aparente, turbidez, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, cloruro, sulfato, sodio, dureza total, hierro total, manganeso total, bacterias coliformes totales y fecales, y metales traza. Los resultados indican que las aguas subterráneas del sector centro occidental del municipio Miranda, pueden considerarse aguas subtipo 1C, de acuerdo con la legislación venezolana, pudiendo ser adecuadas para uso doméstico y/o riego, luego de su acondicionamiento por procesos de potabilización no convencionales.

Palabras clave: Calidad de agua subterránea, contaminación de acuíferos, normativa ambiental venezolana, pozos profundos, usos del agua.

Abstract:

In recent years, the competent agencies of Venezuela have started assessing groundwater aquifers, to know the quantity and quality of water available, however, in many remote regions of the country there is no information regarding these supply sources. The aim of this study was to describe the water quality of 32 deep wells in the west central area of municipality's Miranda from Zulia state (Venezuela), destined for domestic use and/or irrigation. Three samplings were conducted with a frequency of two months, including community wells (public) and private use. The following parameters according to standard methods were analyzed: pH, apparent color, turbidity, electrical conductivity, total dissolved solids, chloride, sulfate, sodium, total hardness, total iron, manganese complete, fecal and total coliform bacteria, and trace metals. The results indicate that groundwater in the west-center area of municipality Miranda can be considered subtype 1C, according to Venezuelan law, and may be suitable for domestic use and/or irrigation, after its conditioning by non-conventional water treatment processes.

Keywords: Aquifers' pollution, deep wells, groundwater quality, Venezuelan environmental regulations, water uses.

1. INTRODUCCIÓN

Según el informe presentado por la Organización de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el Mundo (UNESCO, 2003), la Tierra, con sus diversas y abundantes formas de vida, que incluyen a más de 6.000 millones de seres humanos, se enfrenta en este comienzo del siglo XXI con una grave crisis de agua. Todas las señales parecen indicar que la crisis se está empeorando y que continuará haciéndolo, a no ser que se emprenda una acción correctiva. La creciente demanda del agua a escala mundial acompaña a la disminución de su disponibilidad, aunado a la desigual distribución tempo-espacial de la precipitación, a la contaminación de las fuentes, y quizás a la influencia de los cambios globales, ello ha provocado que el hombre ponga sus esfuerzos

en buscar fuentes alternativas de agua, orientándose hacia el aprovechamiento de las aguas subterráneas, las cuales pueden estar afectadas por un mal uso, tanto del suelo como del agua (Coello y otros, 2002).

Venezuela está haciendo esfuerzos por cuantificar y determinar la calidad de sus recursos hídricos subterráneos a través de entes gubernamentales y universidades. A través de este trabajo se logró inventariar un total de 50 000 pozos a nivel nacional (fines domésticos, agrícolas e industriales), pero se estima que para los mismos fines se hayan construido un total de unos 100 000 pozos (Dautant y Guevara, 2011). Sin embargo, el nivel de estudio que amerita la problemática del agua en cuanto a suministro, calidad y continuidad, no ha sido

¹ Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia, Apartado Postal 526, Maracaibo 4011, Venezuela.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
E-mail: parismarta@gmail.com / janetgutierrez0@gmail.com

suficiente para conocer el recurso a nivel técnico y diseñar estrategias de gestión que permitan la protección de la fuente, suministro y uso racional del recurso a una escala local.

El municipio Miranda del estado Zulia, carece de fuentes de aguas superficiales, el área urbana depende de fuentes estatales vecinas y el área rural de sus aguas subterráneas. El escaso conocimiento de los recursos hídricos subterráneos, especialmente en términos de calidad y conveniencia para fines domésticos y/o agropecuarios ha provocado en ciertos casos desconfianza en su consumo debido a algunas características organolépticas presentes, asimismo dificulta su gestión a nivel municipal para su uso así como la aplicación de tratamientos con bajos costos de instalación y operación en relación a la importancia de los resultados que pueden obtenerse en la mejora de la calidad de la fuente (Vidoni y otros, 2000).

Esta última situación, sumada a la creciente demanda del recurso tanto para uso doméstico como riego e industrial, ha volcado cada día más la mirada y con mayor interés hacia la explotación de sus aguas subterráneas. Pero el escaso conocimiento, fundamental para plantear medidas más adecuadas en su gestión, así como la carencia de programas de evaluación y protección por parte de la municipalidad, expresan en peligro potencial de recursos subterráneos como fuente de abastecimiento. Del mismo modo, es importante no olvidar que, eventualmente, en función de la calidad del agua subterránea el tipo de suelo, la sensibilidad a las sales disueltas del rubro vegetal a explotar, de la precipitación, caudal, sistema de riego y otras variables necesarias a tomar en consideración, pueden resultar en que el agua subterránea también podría ser empleada para el riego agrícola (Ortega y Orellana, 2007; Zérega y otros, 1991).

El presente trabajo tiene como objetivo general describir la calidad de agua subterránea del sector centro occidental del municipio Miranda del estado Zulia (Venezuela), con la finalidad de establecer su adecuación a los criterios establecidos en la legislación vigente para uso doméstico y riego. Se considera que este diagnóstico preliminar es fundamental para encarar cualquier plan de gestión de los reservorios de agua subterránea que atienda la seguridad hídrica de la población.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La zona centro occidental del municipio Miranda del estado Zulia posee un clima semiárido, precipitación promedio anual del orden de 650mm. Fisiográficamente es una planicie, de la depresión del Lago de Maracaibo, cuenca sedimentaria, originada durante el cenozoico como contrapunto del levantamiento de los sistemas montañosos. Forma parte del eje costero de Venezuela, geológicamente formado por aluviones. Algunas de las formaciones

involucradas en el área de estudio y de las cuales se puede observar afloramientos son (PDVSA, 1997):

- i. Formación El Milagro: caracterizada por contener arenas friables, finas a gruesas, muy micáceas, limos, interestratificados con arcillas arenosas, rojas y pardas amarillentas, y lentes lateríticos bien cementados. Presenta dos capas de arcillas arenosas y limosas que cubren horizontes caracterizadas por abundantes nódulos de hierro.
- ii. Formación Tiguaje: donde algunas secciones estudiadas en la superficie, consisten en arcillitas, con espesores variables entre 1.50 a 50 m, donde se encuentran abundantes niveles ferruginosos en las intercalaciones de hasta 5 m de areniscas friables generalmente masivas, de color gris claro o rojizo según el contenido de material ferruginoso.

El área de estudio abarca una superficie de 54 869 ha de zona rural (Figura 1) que representa aproximadamente el 29,3% del municipio Miranda.

De un total de 103 pozos identificados y georreferenciados espacialmente en un mapa escala 1:100.000, fueron seleccionados 32 pozos profundos para el monitoreo, de los cuales 18 pozos eran comunitarios, con mayor uso doméstico y 14 pozos privados con fines agropecuarios. Los criterios tomados en consideración para la selección de los pozos a monitorear fueron: prioritariamente pozos comunitarios, estado de funcionamiento, distancia entre pozos existentes en la zona, información disponible de los mismos y accesibilidad.

Los muestreos se realizaron según diseños de rutas, planificadas según la distancia de los caseríos involucrados, estado de la vialidad, estado del tiempo, distancia entre puntos de muestreos y distancia hasta el laboratorio receptor de las muestras colectadas. Cada ruta era diseñada con un día de antelación a la salida de campo, según el cumplimiento del diseño anterior. Se realizaron tres muestreos con una frecuencia de dos meses, los cuales abarcaron el período entre octubre-2012 y febrero-2013.

La recolección de muestras y las determinaciones analíticas a los fines de caracterizar las muestras de cada uno de los pozos monitoreados, fue realizada según los procedimientos establecidos según APHA (2005): recolectadas por bombeo de agua del pozo y dispuestas en recipientes plásticos de 1 litro, posteriormente se refrigeraron con hielo para su transporte al laboratorio. Las muestras para análisis microbiológicos se colectaron en frascos de vidrio estériles.

Los parámetros analizados fueron: pH, color aparente, turbidez (T), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), cloruro (Cl⁻), sulfato (SO₄⁻²), sodio (Na⁺), dureza total, hierro total, manganeso total, bacterias coliformes totales y fecales, y metales traza (Al, V, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ag, Hg, Li, Pb, Ba y Se).

Con los valores obtenidos de los parámetros evaluados, se analizó la calidad del agua subterránea con base en la normativa legal vigente (Decreto 883/1995), que determina las normas para la clasificación y el

control de la calidad de los cuerpos de agua y de los vertidos líquidos. Ello permite establecer su posible uso doméstico y/o agrícola conforme la clasificación que se muestra en la Tabla 1.

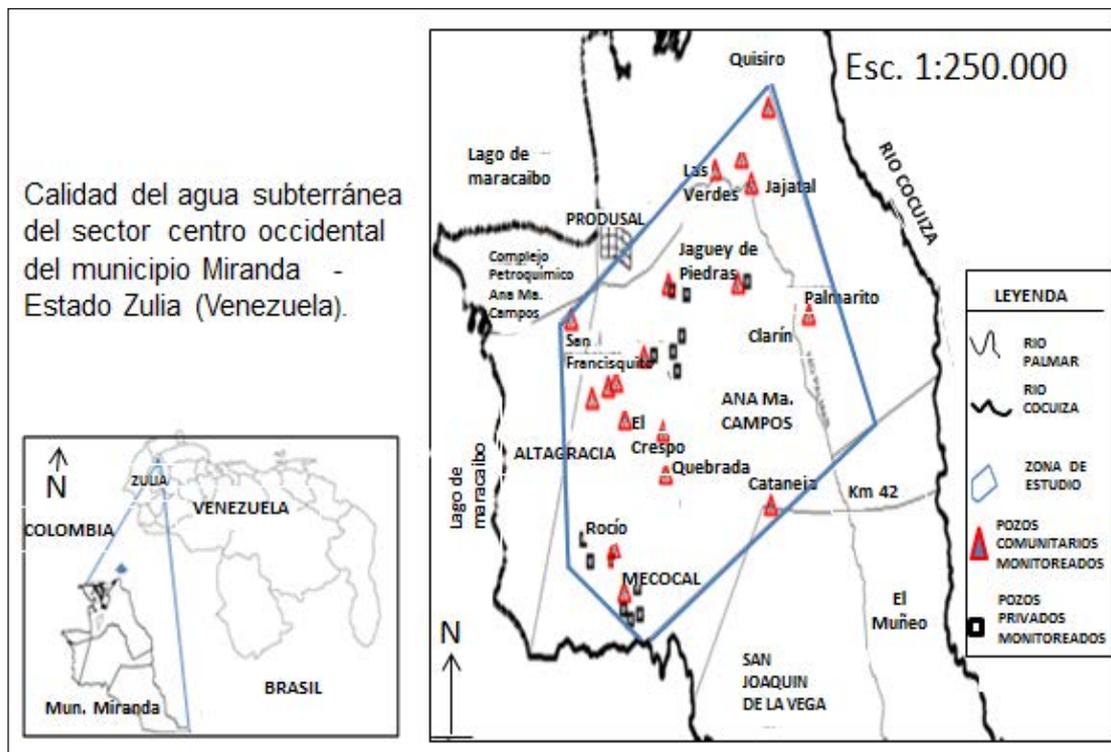


Figura 1. Área de estudio y ubicación de los pozos monitoreados en el municipio Miranda

Tabla 1. Aptitud del agua para uso doméstico y/o agrícola

Clasificación	Características
subtipo 1A	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes
subtipo 1B	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración
subtipo 1C	Aguas que pueden ser acondicionadas por procesos de potabilización no convencional
subtipo 2A	Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano.
subtipo 2B	Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario

En el análisis estadístico de resultados se calcularon las medias aritméticas y las desviaciones estándares. Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, con la finalidad de determinar las diferencias significativas en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos monitoreados, considerando el origen (32 pozos en total) y la procedencia (comunitario Vs. privado). Antes de realizar el ANOVA se comprobaron, tanto la homogeneidad de las varianzas (Test de Bartlett), como la distribución normal de los residuos (Test de Kolmogorov-Smirnov). Para el tratamiento estadístico se utilizó el programa IBM SPSS Statistics.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización fisicoquímica de las aguas de los pozos comunitarios y privados monitoreados se presenta en las Tablas 3 y 4, respectivamente, mostrando diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los diferentes pozos (origen) para los siguientes parámetros: pH, color aparente, sólidos disueltos totales (SDT), Cl⁻, SO₄⁻², Na⁺, dureza total, Mn⁺² e hierro total. No se encontraron diferencias significativas con respecto a la procedencia (comunitario Vs. privado), ni para la interacción procedencia/origen.

En el área de estudio no se encontraron estudios previos relacionados con aguas subterráneas y el

nivel de información geológica no es detallado. Se infiere que las diferencias mostradas en relación a los resultados obtenidos de los parámetros evaluados, entre los pozos monitoreados, pudiesen tener origen geológico y/o influencia costera, puesto que la actividad industrial es muy baja y la zona es rural con poca a mediana actividad agropecuaria.

De acuerdo a los resultados obtenidos de los parámetros evaluados, sólo dos pozos (6,2 %) cumplieron con los límites exigidos por la normativa venezolana, para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes como aguas tipo 1, subtipo 1A (C1 y B4), las cuales desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes, igualmente cumplen para aguas tipo 2.

Dentro de los parámetros evaluados, cuyos valores excedieron los límites establecidos por la norma se mencionan: hierro total, manganeso, sodio, sulfato y pH. Las aguas de los pozos monitoreados, que excedieron al menos uno de estos parámetros, cumplen para aguas subtipo 1C y/o tipo 2, requiriendo las aguas tipo 1C (93,8 % de los pozos monitoreados), ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional, para ser utilizadas con fines de uso doméstico y al uso industrial que requieran agua potable y en el caso de las aguas tipo 2 (65,6 %), las aguas de los pozos monitoreados superaron los límites exigidos por la norma para uso agropecuario.

Con relación a los valores de concentración de hierro total, el 65,6 % de los pozos monitoreados presentaron valores mayores a 1 mg/L; valor límite para aguas sub-tipo 1C de la norma venezolana. El 56,3 % de los pozos monitoreados presentaron valores de Mn^{+2} mayores a 0,1 mg/L, lo cual establece que dichas aguas son de tipo 1C, y el 21,9 % exhibieron concentraciones mayores a 0,5 mg/L, no pudiendo ser empleadas para fines agropecuarios. La presencia de estos dos elementos se infiere tengan relación con las formaciones geológicas involucradas en el área de estudio (Formaciones Milagros y Tiguaje) (PDVSA, 1997), las cuales pudiesen aportar estos elementos a través de sus horizontes caracterizados por la presencia de abundantes nódulos de hierro y sus areniscas friables con material ferruginoso. De esta manera, se presume que ambos elementos podrían tener relación con la disolución de materiales ferromagnesianos presentes en la litología que constituyen los Andes venezolanos, aunado a ello la heterogeneidad litológica de la zona de estudio, terrenos originados en el cuaternario (Montes y otros, 2007).

Algunos de los pozos monitoreados, donde las aguas analizadas presentaron valores de concentración de hierro total que no cumplieron con los límites exigidos por la norma venezolana fueron: M4, M6, W2 y B8, P6, W1A y P4, asimismo los pozos W2, M6, y M4, M1, en relación a los valores de Mn^{+2} .

Con relación al color y el hierro, Vidoni y otros (2000) señalan que las aguas que poseen este último elemento en forma de Fe (II), produce color, requiriendo tratamientos especiales para su remoción, tal es el caso de los pozos M3 y B8, los cuales presentaron valores de color aparente y contenido de hierro total mayor a 4,10 mg/L y 50 UC-Co-Pt, respectivamente, produciendo a nivel de comunidad desagrado tanto estético como de sabor. Según Piña y otros (2002) la tonalidad oscura se debe a la oxidación del hierro soluble presente en el agua, éste al oxigenarse o estar en contacto para aguas con el oxígeno del aire, se precipita generando colores oscuros y rechazo en el consumidor.

Según los resultados obtenidos, el 12,5 % de las aguas de los pozos monitoreados presentaron valores de SDT <1500 mg/L, por lo que pueden ser acondicionadas por procesos de potabilización no convencionales (subtipo 1C). En este sentido, la norma venezolana limita el uso de estas aguas (tipo 2), con fines agropecuarios cuando los valores exceden los 3000 mg/L (valor límite establecido en el Decreto 883/1995), situación ésta que no se presentó en los pozos monitoreados.

La norma venezolana limita la concentración de SO_4^{-2} , Na^+ y Cl^- a valores de 400, 200 y 600 mg/L, respectivamente, para aguas Tipo 1, no limitando las concentraciones para uso agropecuario (aguas tipo 2). En este estudio, concentraciones bajas de SO_4^{-2} se observaron en la zona noroeste, en pozos los denotados como P1, P4, P6, P9 y P15, representando el 15,2 % de la red de pozos monitoreados: Asimismo, se observó que los mismos pozos registraron altos valores de sodio (>200 mg/L), así como los mayores valores de dureza total, pero menores a 500 mg/L, valor exigido por la norma. Otros pozos cuyas aguas excedieron los valores límites de Na^+ , fueron JP2, JP5, B7, B8 y CA.

Con relación al Cl^- , los valores de concentración de este ión son menores a lo exigido por la normativa vigente, pero representan un importante aporte como sales solubles en el agua en los últimos pozos mencionados.

La presencia de los iones SO_4^{-2} en la zona de estudio se infiere pueda tener origen natural, es posible algún depósito de minerales. Piña y otros (2002) señalan que la presencia de altos niveles de sulfatos en algunas aguas subterráneas podría tener origen litológico, es decir disolución de material yesífero, del lavado de ciertas sales del tipo proveniente de rocas sedimentarias (rocas evaporíticas principalmente, como el yeso y la anhidrita). Igualmente, Blyth y Freitas (2001), expresaron que los sulfatos se forman por la evaporación en regiones áridas y semiáridas. Del mismo modo Sánchez y otros (2015) mencionan que los sulfatos son típicos de estos ambientes donde la precipitación es escasa o nula y que se encuentran en cantidades abundantes en las aguas y suelos.

En estudios realizados en el mismo eje costero de la zona de estudio, en Puerto Cumarebo por Peralta y otros (2010), encontraron valores de SO_4^{-2} en el rango de 157 a 1063 mg/L, en diferentes pozos ubicados en un mismo acuífero, donde la geología local ha permitido que aguas dulces entren en contacto directo con agua marina en la zona. Esta situación pudiese permitir inferir que la región centro occidental del municipio Miranda posee el mismo comportamiento, pero

se desconoce el número de acuíferos existentes y la geología local, lo cual no permite conocer el grado de influencia en cuanto a la entrada o intrusión de aguas del mar. Se suma a ello, la ausencia de registros que permitan conocer el comportamiento de este parámetro a través del tiempo, aunque en los pozos monitoreados los promedios encontrados de este parámetro oscilan entre (3,85 y 786,66 mg/L), lo cual refleja bastante heterogeneidad en los valores encontrados.

Tabla 3. Valores medio (n=3) de parámetros analizados en aguas subterráneas de pozos comunitarios en la zona de estudio.

Pozos	pH	Color aparente	T	CE	SDT	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	Dureza total	Hierro total	Manganeso total	Colif. totales	Colif. fecal
Comunitarios	Unid.	UC Pt-Co	UNT	μS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	NMP/100 ml	NMP/100 ml
W2	5.65	4.67	9.67	899.67	573.87	264.26	4.91	107.92	160.09	10.08	1.67	2.20	2.20
G12	6.47	5.00	2.00	772.00	556.61	98.38	48.31	125.51	87.92	0.31	0.35	2.20	2.20
CA	7.15	11.67	2.67	1323.33	1043.46	101.46	59.09	255.39	101.36	0.40	ND	3.17	2.20
C1	6.11	5.33	1.67	614.00	416.13	167.62	3.85	86.59	116.00	0.28	ND	2.20	2.20
P6	6.62	8.33	1.67	3245.00	2343.68	361.72	786.66	524.23	471.36	2.09	0.13	2.20	2.20
G21	6.27	20.00	9.33	548.33	404.02	96.80	45.50	94.18	55.55	3.45	0.32	2.20	2.20
JP2	7.26	10.33	4.00	1313.33	950.26	263.59	135.01	242.39	118.94	0.74	ND	2.20	2.20
P1	6.51	2.33	1.00	1959.33	1469.72	152.62	524.49	282.05	380.91	1.84	0.17	2.20	2.20
P9	6.55	0.67	0.67	2210.00	1591.59	157.08	625.45	315.01	380.42	1.25	ND	2.20	2.20
B4	6.52	15.33	6.00	671.33	484.43	84.15	58.56	122.63	60.35	0.95	0.03	3.30	3.30
P15	7.07	8.33	2.33	2229.00	1603.52	216.01	559.04	374.10	298.11	1.22	0.13	2.20	2.20
P4	6.63	2.33	0.67	1963.33	1405.67	95.45	581.96	243.07	405.02	1.53	0.01	3.30	2.20
M1	6.25	41.67	10.67	600.33	419.21	100.25	24.02	102.75	68.62	3.97	0.31	6.80	2.20
M3	5.91	66.67	149.33	644.00	441.56	136.07	33.51	98.77	80.31	4.10	0.26	2.20	2.20
W1A	6.13	6.67	10.63	805.00	490.97	266.24	4.53	110.01	147.04	2.26	0.08	2.20	2.20
W1	5.58	3.67	1.00	953.33	672.46	327.47	6.45	105.02	220.34	0.49	ND	2.20	2.20
M6	6.06	3.67	81.67	861.33	551.29	250.92	31.03	113.16	150.99	10.08	1.12	2.20	2.20
M4	6.13	13.33	26.00	747.67	469.24	203.29	11.87	96.50	128.58	11.08	0.73	3.30	3.30

ND: no detectable. límite de detección = 0.9 μg/L

Tabla 4: Valores medio (n=3) de parámetros analizados en aguas subterráneas de pozos privados en la zona de estudio.

Pozos	pH	Color aparente	T	CE	SDT	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	Dureza total	Hierro total	Manganeso total	Colif. totales	Colif. Fecal
Privados	Unid.	UC Pt-Co	UNT	µS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100 ml	NMP/100 ml
G14A	6.74	23.33	6.67	892.00	660.76	128.03	53.77	175.98	79.39	1.52	ND	2.20	2.20
B3	6.32	2.33	1.33	845.67	627.78	87.50	72.88	149.34	105.28	0.44	0.24	2.20	2.20
B13A	5.86	13.33	7.67	846.67	543.48	266.35	4.96	108.74	149.03	4.84	1.08	3.17	2.20
B11	5.67	12.00	0.33	1045.00	665.86	357.10	27.89	131.28	204.41	0.34	ND	6.80	2.20
JP5	7.41	13.67	3.00	1840.00	1360.57	313.30	227.67	366.35	149.89	0.55	ND	6.80	2.20
G11	6.65	18.67	3.33	927.00	666.45	154.87	82.61	160.82	113.74	1.35	0.05	2.20	2.20
C4	6.47	11.67	14.00	619.00	484.36	70.15	34.68	103.91	65.74	2.17	0.13	2.20	2.20
B7	6.95	7.00	2.33	2404.33	1723.35	387.46	253.43	510.66	124.35	0.51	ND	6.80	2.20
G7	6.32	18.67	6.33	689.67	495.00	197.93	6.86	86.48	126.28	3.62	1.35	6.80	2.20
JP15	6.40	3.67	2.33	954.00	689.74	272.35	30.15	176.60	120.44	1.07	0.02	2.20	2.20
C3	6.36	13.33	1.00	621.67	449.68	104.28	37.62	98.35	80.63	1.77	0.58	2.20	2.20
B8	5.81	105.00	57.00	1844.33	1298.49	330.04	287.74	334.34	155.92	9.18	0.80	6.80	6.80
B5	6.89	21.67	5.67	702.67	523.51	89.81	45.40	133.70	52.80	2.99	0.12	2.20	2.20
SCm	6.40	21.67	5.10	648.00	468.41	107.24	31.89	108.74	73.51	0.66	0.18	2.20	2.20

ND: no detectable. límite de detección = 0.9 µg/L

En cuanto al origen de Cl⁻ y Na⁺, el primero frecuentemente está asociado al segundo, especialmente en aguas muy salinas. El origen de Cl⁻ se presume sea ocasionado por el agua de mar. Según Díaz y otros (2005), puede deberse a que el agua del mar haya quedado atrapada en los sedimentos juveniles o meteóricos de la disolución de evaporitas. En el caso de aguas costeras, su presencia pudiese deberse a la intrusión de aguas saladas, asimismo, en relación a las fuentes de este ión, Díaz y otros (1998), indicaron que es un componente minoritario de la corteza terrestre, pero si las aguas subterráneas lo contienen en grado importante su origen puede deberse a varias fuentes, como el agua del mar, salmueras (cuerpos de agua con salinidad mayor a la del mar) o también provenir del lavado de rocas evaporíticas cloruradas (cloruro de sodio o sal común), de lluvias o de vertidos industriales. Pagador y otros (2011), señalaron que el Na⁺, puede estar contenido en algunas arcillas y feldespatos.

El rango de valores promedio de pH reportados en este estudio oscilan entre 5,58 y 5,91 unidades, valores muy cercanos al pH exigido por la normativa vigente (6,0 a 8,5), no obstante, se consideran que no cumplen para este parámetro. Los pozos B11 y W1 cumplieron con los valores exigidos por la norma para todos los parámetros, a excepción del pH. Según Hernández y otros (2010), valores de pH entre 5,2 y

6,6 unidades, están relacionados con procesos de disolución de material silicatado y aluminosilicatos.

Con relación a los elementos traza analizados, todas las concentraciones estuvieron por debajo de los límites permisibles establecidos en la norma venezolana, pudiéndose destinar estas aguas a fines doméstico y/o agropecuario (tipo 1 y 2).

Pese a la escasa actividad antrópica que se desarrolla en el área de estudio, la presencia de elementos traza encontrados en este estudio podría deberse a actividades de extracción de carbón, los cuales liberan iones como Zn, Pb, Ni, Cr y Ba (López y otros, 2013).

Bacteriológicamente no se encontraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) para las densidades de bacterias coliformes totales y fecales entre los diferentes pozos monitoreados, ni tampoco con respecto a la procedencia de los pozos. Todas las muestras de agua subterránea monitoreadas en este estudio presentaron valores de estos parámetros por debajo del límite exigido por la normativa para aguas tipo 1 y 2 fijadas en el Decreto 833/1995.

Se infiere, que a pesar de que los caseríos ubicados en la zona de estudio poseen pozos sépticos y actividad agropecuaria, la entrada de indicadores microbianos a estas aguas ha tenido cierta resistencia para llegar a las zonas no vadosas como profundidad del nivel freático, recarga hídrica, suelos, entre otros (Zektser y otros, 2004).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las aguas subterráneas del sector centro occidental del municipio Miranda (Estado Zulia, Venezuela) pueden considerarse aguas subtipo 1C, de acuerdo con la legislación venezolana vigente (Decreto 833/1995). Se trata de aguas adecuadas para uso doméstico y/o riego, luego de su acondicionamiento por procesos de potabilización no convencionales en la mayoría de los casos.

La calidad del agua subterránea fue significativamente diferente en los distintos pozos monitoreados, particularmente con respecto al pH, color aparente, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, cloruro, sulfato, sodio, dureza total, hierro, ortofosfatos y manganeso, mostrando la influencia de las características propias de cada pozo. No se encontraron diferencias significativas con respecto a la procedencia del pozo (comunitario y privado).

La caracterización presentada en este trabajo aporta elementos que contribuyen al diagnóstico de situación actual de los acuíferos que constituyen la única fuente de abastecimiento de agua en el municipio Miranda.

A la luz de los resultados obtenidos, se recomienda continuar realizando muestreos sistemáticos del agua utilizando en principio los pozos identificados en esta investigación. Esto permitiría obtener registros para evaluar el comportamiento del sistema hídrico en un período más prolongado.

Del mismo modo, se considera indispensable desarrollar un estudio hidrogeológico a escala local para lograr una mejor caracterización de las formaciones geológicas que componen el sistema acuífero, definir la geometría e hidrodinámica de este sistema, determinar la vulnerabilidad de los acuíferos que sustentan el abastecimiento del municipio y caracterizar la amenaza de contaminación que representan las actividades socio-económicas que se desarrollan en el área.

A partir de ello se podrán definir medidas para la protección del recurso basadas fundamentalmente en el ordenamiento del uso del territorio, el diseño de una red de monitoreo de la calidad y cantidad del sistema hídrico subterráneo y eventualmente restricciones y/o controles a los caudales de extracción y tiempos de bombeo de los pozos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA - American Public Health Association, American Water Works Association (AWWA) and Water Environmental Federation (WEF). 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Ed. Washington D.C, USA.

Blyth, F. y Freitas, M. 2001. Geología para ingenieros. 8^{va} impresión. Editorial. Compañía Editorial Continental, S, A. México, México, pp. 131-185.

Coello, X. y Galarraga, H. 2002. Metodologías para el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos en medios urbanos; el caso de Quito, Ecuador. Groundwater human development. Eds. Bocanegra E., Martínez D., Massone H, pp. 33-45.

Dahrazma, B. y Kharghani, M. 2012. The impacts of alkaline mine drainage on Ba, Cr, Ni, Pb and Zn concentration in the water resources of the Takht coal mine, Iran. Earth Sciences Research Journal, 16 (2), pp. 27-30.

Dautant, R. y Guevara, E. 2011. Recursos Hídricos Venezuela 2011. Centro del Agua para América Latina y el Caribe. Informe Técnico. Disponible en: <http://centrodelagua.org>. Consultada el 15/08/13.

Díaz, C.; Esteller, M. y López-Vera, F. 2005. Recursos Hídricos. Conceptos básicos y estudios de casos en Iberoamérica. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. Centro Interamericano de Recursos de Agua. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México. Piriguazú ediciones. Montevideo, Uruguay. pp IV-32.

Díaz, E., Duarte, O., y Ricciardi, C. 1998. Tecnología de Tierras y Aguas 1. Tema 7. Aguas subterráneas. p, 10. Disponible en: <http://www.fca.uner.edu.ar/academicas/deptos/catedras/riego/Archivos/Cap%2007%20-%20Aguas%20Subterranas.pdf>. Consultada 09/07/2013.

Hernández, M., Crisanto, S., Lozano, F., Martínez, M., Díaz, A., Márquez, R., Chacón, H. y Rodríguez, I. 2010. Concentraciones de hierro (Fe) en las aguas subterráneas al sur del estado Monagas, Venezuela. ALHSUD. X Congreso Latinoamericano Hidrología. Octubre 18-22. Caracas, Venezuela.

López, B., Ramos, J., Moran, J., Cardona, A. y Hernández, G. 2013. Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso en el valle de San Luis Potosí. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 65 (1), pp. 9-26.

Montero, R., Yanes, C. y Redondo, R. 2007. Evolución geoquímica e identificación de los procesos que controlan la composición química de las aguas subterráneas de la región sur-central, Cuenca del Lago del Lago de Maracaibo, Venezuela. IX Congreso Geológico Venezolano. Octubre 21-25. Caracas, Venezuela.

Ortega F, S. y Orellana G, R. 2007. El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar. I. Aguas salinas o alcalinas, Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 16 (1): 41-44. Web.ebscohost.com. Consultada 30/10/13

Pagador, C., Avalos, O. y Quintana, J. 2011. Evaluación de las aguas subterráneas del acuífero Asia-Omas. Ministerio de Agricultura. Lima, Perú, pp. 4-11.

- PDVSA - Petróleos de Venezuela, S.A. 1997. Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. Editado por el Comité Interfilial de Estratigrafía y Nomenclatura (CIEN). Disponible en: <http://www.pdvs.com/lexico/t29w.htm>. Consultada el 25/30/2013.
- Peralta T., Barros, H., Izarra, C., Barros, A., Decarli, F., Lemmo, A., Arriojas, A., Palacios, D., Sajo, L. 2010. Caracterización de acuíferos costeros de Pto. Cumarebo, estado Falcón, Venezuela. ALHSUD. X Congreso Latinoamericano Hidrología Octubre 18-22. Caracas, Venezuela.
- Piña M., Rivera M y González A. 2002. Remoción de hierro y manganeso en fuentes de agua para abastecimiento público aplicando una técnica de adsorción-oxidación que utiliza zeolita natural como medio de contacto en los estados de Sinaloa y Chihuahua. FEMISCA. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 27 al 31 de Octubre. Cancún, México
- Sánchez, R., Guerra, L., Scherger, M. 2015. Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina. Programa Nacional del Agua. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires, Argentina. 65 pp
- UNESCO - Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. 2003. Agua para todos, agua para la vida "Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos hídrico en el Mundo". Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf>. Consultada el 06/04/2012.
- Vidoni, R., Pacini, V., Ingallinella A. M., y Sanguinetti, G. 2000. Remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas mediante biooxidación: Experiencia Real. Rev. Ingeniería Sanitaria, AIDIS, N°87, pp. 1-7.
- Zektser, I., Pozdniakov, S., Szpakiewicz, M., Rogachevskaya L. 2004. Regional assessment of groundwater in the Snake River plain aquifer basin. Geophysical International, 43 (4), pp. 697-705.
- Zérega, L., Hernández, T. y Valladares J. 1991. Caracterización de suelos y aguas afectadas por sales en zonas cañameleras de azucarera Río Turbio. FONAIAP, 9 (1), pp. 5-52.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA HIDRÁULICA CON INFORMACIÓN DE ACTORES SOCIALES EN LA CUENCA DEL ARROYO LAS TURBIAS. SANTA FE. ARGENTINA

HYDROLOGICAL HYDRAULIC MODELING WITH INFORMATION FROM SOCIAL ACTORS IN THE ARROYO LAS TURBIAS BASIN. SANTA FE. ARGENTINA

Morresi, M.¹; Marcus, R.¹; Gardiol, M.² y Biancotti, E.¹

Resumen

Al delinear políticas de planificación territorial, en sectores que presentan cursos hidrográficos, es necesario estimar los caudales de dichos cursos y delimitar el grado de afectación hídrica producida por la variabilidad y cambios climáticos actuales. Y como consecuencia proyectar, construir o modificar obras hidráulicas o viales que contribuyan a disminuir el riesgo hídrico en el aspecto social y territorial. La mayoría de los cursos principales que integran las cuencas hidrográficas de la provincia de Santa Fe presentan registros hidrológicos sistemáticos sólo en secciones de control con obras hidráulicas importantes (puentes) que generalmente corresponden a las proximidades de la desembocadura de la cuenca. Sin embargo, esta situación no ocurre en los cursos secundarios, lo que imposibilita establecer con certeza caudales especialmente en los sitios intermedios y es en estos casos cuando la habilidad del modelista lo lleva a buscar otras fuentes de información de registro no regular. En efecto, existen registros fotográficos, documentos escritos e informes orales de diferentes crecidas producidas en varias localidades y regiones, los cuales podrían ser utilizados para establecer niveles de desbordes (bankfull), magnitud y grado de afectación de las crecidas. Este trabajo es parte de los resultados de la investigación realizada durante el desarrollo del Proyecto CAI+D 2011: "Aplicación de procesos fotogramétricos terrestres en cuencas hidrográficas sin registros hidrológicos sistemáticos, en el contexto de la variabilidad climática", de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral. El propósito del estudio fue calibrar los parámetros de los modelos hidrológico e hidráulico tomando como datos de referencia registros no sistemáticos de las crecidas. Se presentan los resultados de la calibración simultánea de los modelos considerando como datos observados, las cotas del pelo de agua y anchos de planicie de inundación medidas y obtenidas por procesos topográficos y fotogramétricos en algunas secciones del arroyo. Se simularon tormentas reales ocurridas en los meses de diciembre de 2012 y agosto de 2015 y los resultados de la investigación muestran una concordancia aceptable entre las cotas del nivel de agua observadas y simuladas en diferentes puntos intermedios de control del tramo de propagación seleccionado. Las secciones con estructuras hidráulicas presentaron errores superiores al 1 %. Se destaca la valiosa información de los actores locales, especialmente los productores que hicieron posible la generación de datos de referencia considerados para la calibración de los parámetros de los modelos en los escenarios meteorológicos seleccionados.

Palabras Clave: Modelación hidráulica, calibración, crecidas, actores.

Abstract

When delineating spatial planning policies, in sectors with major streams, it is necessary to estimate the flows of these streams and delimit the degree to which the current climatic variability and change may affect those flows. And, as a consequence, to plan, construct or modify hydraulic structures or roads that contribute to reducing the water risk in the social and territorial aspects. Most of the main streams that make up the watersheds of the province of Santa Fe only have systematic hydrological records in control sections with important hydraulic structures (bridges) that generally correspond to the vicinity of the mouth of the basin. Nevertheless, this situation does not occur in secondary streams, making it impossible to establish with certainty flow rates, especially at intermediate sites, and it is in these cases when the modeler's training leads him to look for other sources of non-traditional records or measurements. Indeed, there are photographic records, written documents and oral reports of different floods produced in several localities and regions that could be used to establish overflows (bankfull), magnitude and degree floods damage. This work comprises part of the results of the research carried out during the development of the CAI+D 2011 project: "Application of terrestrial photogrammetric processes in watersheds without systematic hydrological records, in the context of climatic variability", Faculty of Engineering and Water Sciences, Litoral National University. The purpose of the study was to calibrate the parameters of the hydrological and hydraulic models taking non-systematic records of floods as reference data. The results of the simultaneous calibration of the models are presented, considering as observed data, the water levels and the floodplane widths measured and obtained by topographic and photogrammetric processes in some sections of the stream. Real December 2012 and August 2015 Storms were simulated and the results of the investigation show an acceptable concordance between the water level observed and simulated in different intermediate control points of the of the chosen stream routing. The sections with hydraulic structures presented errors higher 1%. It highlights the valuable information of the local actors, especially the agricultural producers who made it possible to generate reference data considered for the calibration of the model parameters in the selected meteorological scenarios.

Keywords: Hydraulic modeling, calibration, floods, actors.

1 Departamento Hidrología.

2 Departamento Cartografía y Agrimensura. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria. Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000). Santa Fe, Argentina.
Tel:(+54)(0342)4575233/34. Fax:(+54)(0342)457-5224, mariadelvallemorresi@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos se utilizan para estimar la respuesta hidrológica de la cuenca, mediante la representación de las condiciones topográficas e hidráulicas de la realidad.

El desarrollo de paquetes de software para simulación hidrológica es muy amplio, disponiéndose en la actualidad de muchos modelos de aplicación universal, con validez internacional y algunos de versión libre. Los más reconocidos son desarrollados por grupos de Ingeniería Hidrológica como HEC (Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers), MIKE (Danish Hydraulic Institute), SWMM (Storm Water Management Model, EPA), SWAT (Soil y Water Assessment Tool, Texas A&M University, USA), y ISIS FLOW (Halcrow Group).

Una de las preocupaciones más frecuentes de los hidrólogos es la calibración de los modelos y el problema es la carencia de datos observados. Los datos para calibrar los parámetros de los modelos matemáticos generalmente provienen de las mediciones hidrológicas sistemáticas.

Cuando no hay mediciones el gran desafío es encontrar opciones para estimar datos de referencia para calibrar los parámetros de esos modelos y luego verificarlos o validarlos. Estas estimaciones surgen de la interrelación de diferentes técnicas e equipamientos (fotogrametría, teledetección, laser aerotransportados, levantamientos topográficos con GPS, estación total, etc.), como se presentan en los trabajos de Wenchao (2010), Chandler et al. (2008), Wackrow et al. (2008) y Samad et al. (2010).

De acuerdo a Palacio et al. (2010), los modelos numéricos deben ser calibrados y verificados antes de ser puestos en funcionamiento. No hay un procedimiento ampliamente aceptado para llevar a cabo esta tarea ya que la calibración depende de varios aspectos como la disponibilidad de datos, las características del cuerpo de agua y sobre todo de la percepción, opinión y experiencia de los modeladores. La combinación de complejidad en los parámetros numéricos y físicos, así como la misma estructura del modelo hidrodinámico y los errores en las mediciones de campo, son factores que condicionan la confiabilidad de los resultados.

Cuando hay carencia de registros sistemáticos el hidrólogo debe recurrir a otras alternativas para calibrar y validar los modelos, que permitan disminuir la incertidumbre de los resultados. Especialmente la definición de las condiciones de borde de los modelos hidrodinámicos requiere de información precisa de cotas hidrométricas y de la topografía del tramo. Para determinar niveles de inundación los hidrólogos usualmente recurren a rastros de niveles máximos alcanzados por las crecidas recopilan datos de lugareños y recaban datos de niveles junto

a propietarios afectados, baqueanos de la zona y personal de los organismos públicos. (CFI, 2001; MASPyMA, 2009; SIPFE, 2007).

En la República Argentina, el Ministerio de Planificación Federal de la Nación (2008), detalla que son preocupantes los indicios del cambio climático y se están haciendo sentir sobre los recursos hídricos.

Calcagno et al (2000) especifican que en la República Argentina no existe un banco de datos y sistema de información integral sobre los recursos hídricos, tanto a nivel nacional como en las provincias, que coordine el acceso a las informaciones existentes, de las distintas jurisdicciones, dé sustento a la gestión y facilite la comunicación. Detallan que en realidad, no se dispone de una red sino de un conjunto de estaciones de medición con fines sectoriales o locales operados por diversos organismos no coordinados que recogen información sobre los recursos hídricos y en donde en muchas provincias las capacidades de inspección, mantenimiento y operación de estaciones y de la información son limitadas.

En el informe del taller nacional organizado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2007a) y el Consejo Hídrico Federal (COHIFE) para formular un Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos, los informes de las distintas jurisdicciones del país manifestaron como uno de los problemas que requiere soluciones es la falta de redes de información básica.

Específicamente en el informe realizado en la provincia de Santa Fe, para formular el Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2007b) se destaca que para lograr un plan de gestión integrada de los recursos hídricos provinciales es necesario implementar una red de monitoreo. Esta situación se confirma al intercambiar opinión con diferentes profesionales relacionados a los recursos hídricos que desempeñan su actividad en diferentes organismos públicos, los cuales manifiestan que en muchas oportunidades se realizan estimaciones de caudales y cálculos hidráulicos con escasos datos hidrométricos.

Ante esta problemática, se generó un proyecto de investigación que utilice información no sistemática (fotografías, alturas y anchos de afectación, etc.) proporcionada por actores sociales (productores, intendentes, representantes técnicos, instituciones intermedias, etc.) para la calibración de modelos matemáticos. En este trabajo se muestran los resultados de la calibración simultánea de los modelos hidrológico e hidráulico contando como datos observados, las cotas del pelo de agua y anchos de planicie de inundación medidas en campo y las obtenidas por topografía y fotogrametría en algunas secciones del arroyo. Se utilizaron las tormentas reales ocurridas en diciembre de 2012 y agosto de 2015.

METODOLOGÍA

Descripción del lugar de estudio e información oficial disponible

El arroyo Las Turbias es un afluente del arroyo Carrizales-Monje, tiene una longitud de 81 km y la cuenca hidrográfica ocupa una superficie aproximada de 1000 km². Abarca los departamentos Belgrano (distritos, Las Rosas y Bouquet), Iriondo (distrito Clason), San Jerónimo (distritos San Genaro y Díaz) y San Martín (distritos María Susana y Los Cardos), entre 61°55'48" y 61°09'54" de longitud oeste y 32°27'18" y 32°16'00" de latitud sur, como muestra la Figura 1 (Morresi et al, 2014).

En su extremo aguas arriba, -cuenca alta-, el arroyo recibe las aguas de una importante red de canales y bajos naturales (paleocañadas) correspondientes principalmente a los distritos de María Susana, Bouquet y Las Rosas. Esta zona se caracteriza,

además, por su escasa pendiente (menor al 1%), a lo que se le suma, la presencia de una amplia red vial que juegan un rol muy importante en el sistema de drenaje ya que, por un lado interrumpen el escaso escurrimiento debido a los altos terraplenes (esto ocurre en general en las rutas principales) y en otras ocasiones hacen de conductores por encontrarse a igual o menor cota que los terrenos lindantes (en general los caminos comunales).

La zona media de la cuenca (comprendida entre las rutas provincial N° 13 y nacional N° 34 aproximadamente), por el contrario, tiene pendientes importantes, que llegan en algunas zonas al 3% y no posee los rasgos fisiográficos mencionados para la alta cuenca, por lo que no presenta problemas de anegamiento. Se han contabilizado por lo menos 21 cruces viales en este tramo, incluyendo la ruta nacional N° 34, el ferrocarril y la traza vieja de la ruta nacional N° 34. (Palman, 2012).

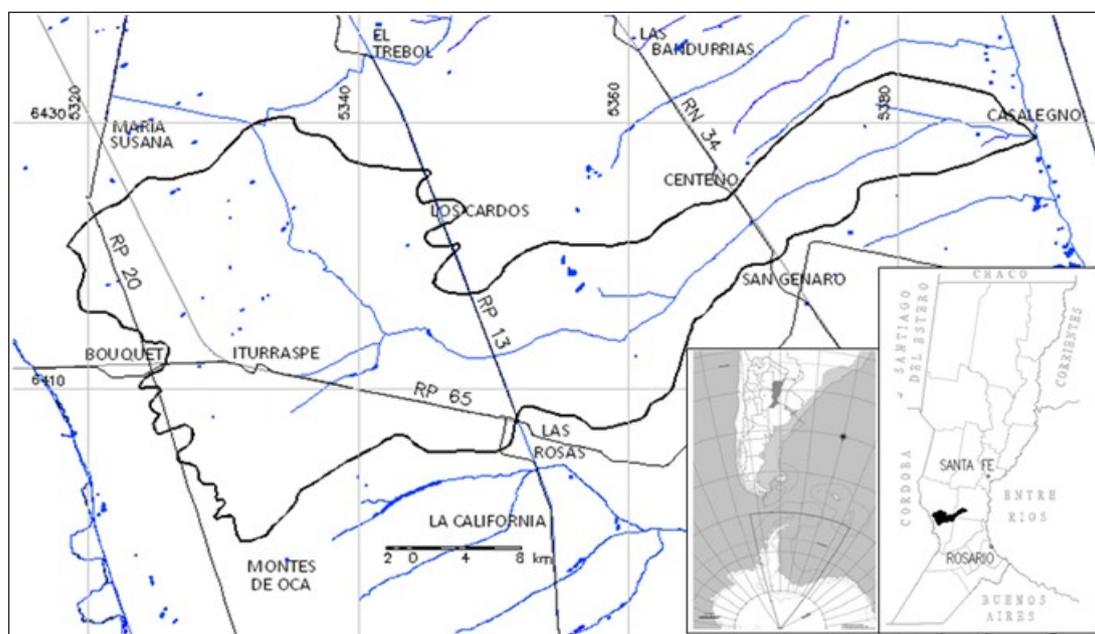


Figura 1. Ubicación cuenca del Arroyo Las Turbias

La zona baja de la cuenca, comprendida entre la ruta nacional N° 34 y la desembocadura en la Cañada Carrizales, es también una zona con bajas pendientes, aunque no inferiores a las de la alta cuenca. Presenta bajos de importantes dimensiones (anchos y largos) que van paralelos al cauce principal en algunos casos y en otros han sido canalizados hacia el este. Esta zona, debido a los procesos de hidromorfismo, presenta suelos de menor calidad para la agricultura.

La cuenca no posee registros históricos en ninguna sección del arroyo. Solamente en el mes de septiembre del año 2003 y como producto de un Proyecto de Extensión de Interés Social (FICH-UNL, 2002-2004): "Minimización del impacto de las inundaciones y sequías en la cuenca del Arroyo Las Turbias", se instaló un limnógrafo ubicado aguas

arriba de la ruta nacional N° 34 que cuenta con registros -casi continuos- desde el 5/5/2004 hasta el 22/2/2008, con faltante de datos debido a fallas en el mecanismo de registro. También se cuenta con algunos aforos en aguas bajas. Posteriormente el Comité de Cuenca del arroyo Las Turbias lo reemplazó por un instrumento digital, pero hasta diciembre 2016 no había personal preparado para operar este instrumento.

Como base cartográfica se utilizó un mapa digital que contiene las localidades, rutas principales y secundarias, caminos comunales, límites políticos, ferrocarriles, topónimos, hidrografía, límite de cuenca y subcuencas. Dicha información fue obtenida en el Servicio de Catastro e Información Territorial (SCIT) y en el Ministerio de Infraestructura y Transporte (MIT) (ex. Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y

Medioambiente, MASPMA) de la provincia de Santa Fe, que fue contrastada con las cartas topográficas confeccionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en escala 1:50000 (Morresi et al, 2014).

Se dispuso de perfiles topográficos transversales y longitudinales con obras de arte, distanciados entre 400 m y 1200 m, relevados por la Secretaría de Recursos Hídricos del MIT en planos formato papel y formato digital desde la progresiva 0 m en la confluencia del arroyo Las Turbias y el arroyo Carrizales-Monje hasta la progresiva 68626 m próxima a la laguna de Bossio, al sur de la ruta provincial N° 44-S.

Modelación matemática de la cuenca del arroyo Las Turbias

Para implementar el modelo hidrodinámico HEC-RAS V4.1 (United States Army Corps of Engineers, 2014) se seleccionó el tramo comprendido entre las progresivas aguas arriba (AA) 68626 m (última progresiva con perfil transversal relevado topográficamente) y las progresivas aguas abajo (aa) 14400 m, para no tener influencias de remanso del arroyo Carrizales-Monje.

Debido a la carencia de registros en las condiciones de borde y secciones del tramo, para implementar el modelo hidrodinámico, se generaron hidrogramas de referencia con el modelo hidrológico HEC-HMS V 4.0 (United States Army Corps of Engineers, 2014), en las progresivas mencionadas y en intermedias del tramo como aportes de cuencas laterales al curso principal.

La calibración de los parámetros de los modelos contempló un proceso iterativo simultáneo con ambos modelos (hidrodinámico e hidrológico).

En los puntos de control para la calibración se tuvo en cuenta distintos tipos de información (marcas de aguas, anchos de inundación, fotografías) obtenidas de diferentes fuentes (productores, instituciones agropecuarias, medios de prensa). Toda la información fue medida topográficamente para obtener las cotas de referencias. En algunos casos, donde se disponía de varios valores altimétricos en un mismo lugar o progresiva, se contrastaron los mismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tormentas seleccionadas para calibrar y validar los modelos

Se dispuso de información pluviométrica diaria histórica de distintas fuentes oficiales y particulares. De instituciones oficiales se recopiló información de: Agricultores Federados Argentinos (AFA), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Dirección de Provincial de Comunicaciones (DPC).

Como fuente de información privada se relevó en territorio la percepción de los productores acerca de las características y efectos de los últimos

fenómenos intensos que ocasionaron problemas de inundaciones en toda la cuenca y algunos brindaron información pluviométrica de registros propios como también registros fotográficos u otra información que contribuya con la selección de los eventos meteorológicos.

La información pluviométrica de los productores permitió completar la información oficial y modificó sensiblemente la distribución espacial de la precipitación en la cuenca y arrojaron un aceptable análisis de consistencia (Biancotti et al, 2015). La elección de los eventos reales a simular se vinculó a la cantidad y calidad de información de las crecidas significativas registradas por los productores e instituciones locales. Como característica regional las Figuras 2 y 3 muestran las isohietas mensuales de agosto de 2015 y diciembre de 2012 obtenidas con la precipitación de las estaciones intervinientes en la cuenca. Para el cálculo y trazado de las isohietas se utilizó una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa. Es, esencialmente, una técnica de spline de lámina delgada discretizada del programa computacional ArcGIS en la versión 10.2.1, generando una capa de ubicación de estaciones sobre un modelo digital de terreno (DEM) del mismo software.

Si se analizan las Figuras 2 y 3, donde las isohietas muestran el monto mensual precipitado, el escenario de 2012 fue más húmedo, de características de precipitación continua, dado que en la cuenca llovía desde el mes de octubre, por lo tanto, la humedad antecedente fue mayor en este caso. En el escenario de agosto de 2015 no se registraron precipitaciones antecedentes por lo que la cuenca poseía una condición más seca al momento de ocurrir la tormenta. Para la calibración de los parámetros de los modelos se seleccionó la tormenta del 5 al 14 de agosto de 2015, porque fue posible ir a campo y disponer de mediciones topográficas de las alturas de agua y anchos de planicie inundada, datos observados necesarios para el modelo hidrodinámico. Para validar los modelos se utilizó la tormenta del 14 al 20 de diciembre de 2012.

Las Figuras 4 y 5 muestran los hietogramas de las estaciones oficiales y de productores ingresados como series de tiempo y ponderados por el método de Thiessen en el modelo hidrológico HEC-HMS. Se observa que los mayores montos pluviométricos de la tormenta de agosto de 2015 se concentran entre el 8 y el 10 de agosto. No hubo registros pluviométricos en las estaciones Bouquet y Montes de Oca, siendo las precipitaciones máximas diarias menores en promedio de 20 mm respecto de las del escenario 2012.

Mientras que para la tormenta de diciembre de 2012 los mayores montos pluviométricos se concentran entre el 16 y 20 de diciembre y según la información de los diferentes productores consultados, la altura de agua máxima alcanzada ocurrió entre el 19 y 20 de diciembre.

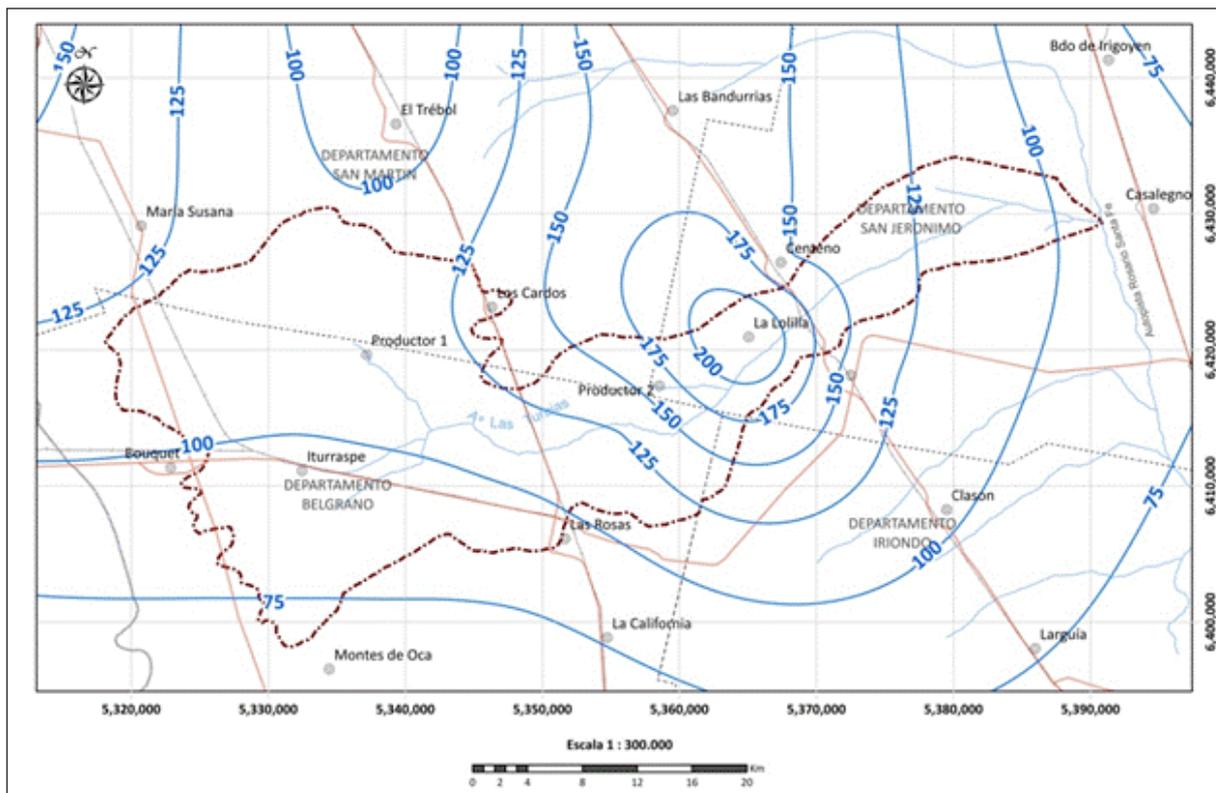


Figura 2. Isohietas (mm) del mes de agosto de 2015

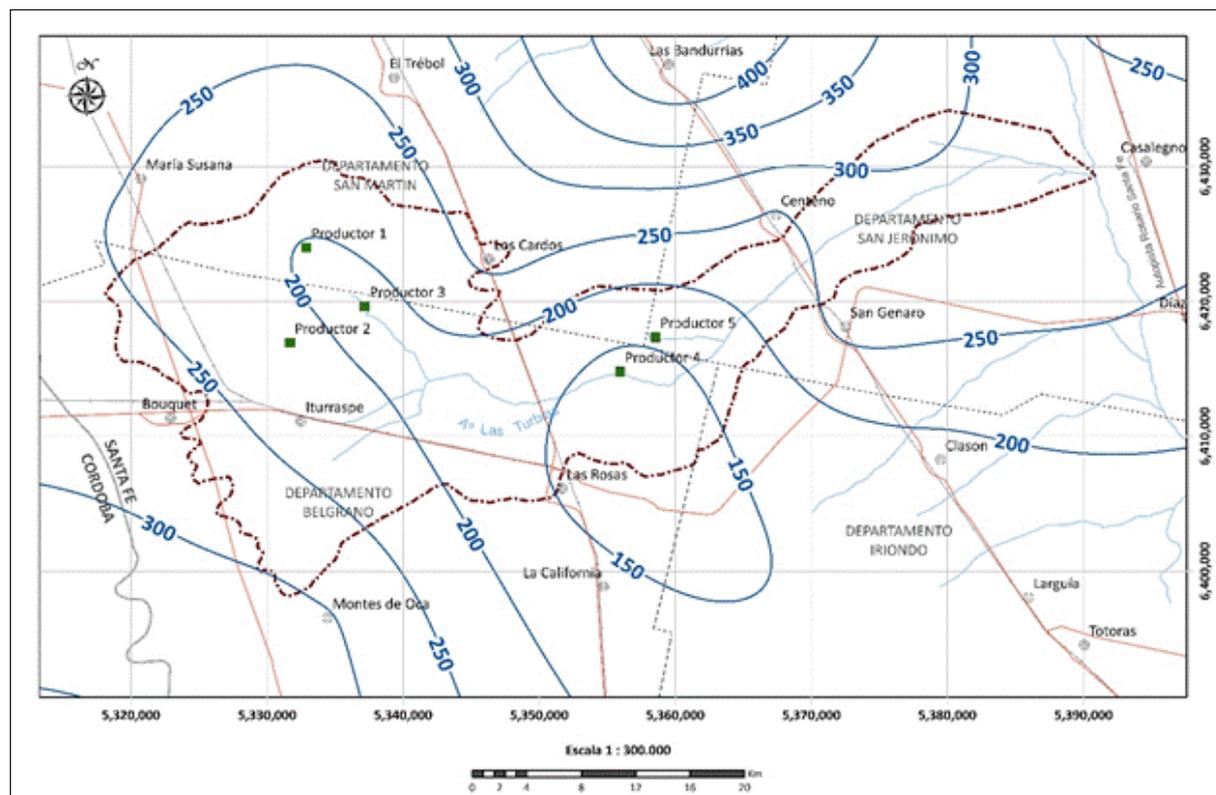


Figura 3. Isohietas (mm) del mes de diciembre de 2012

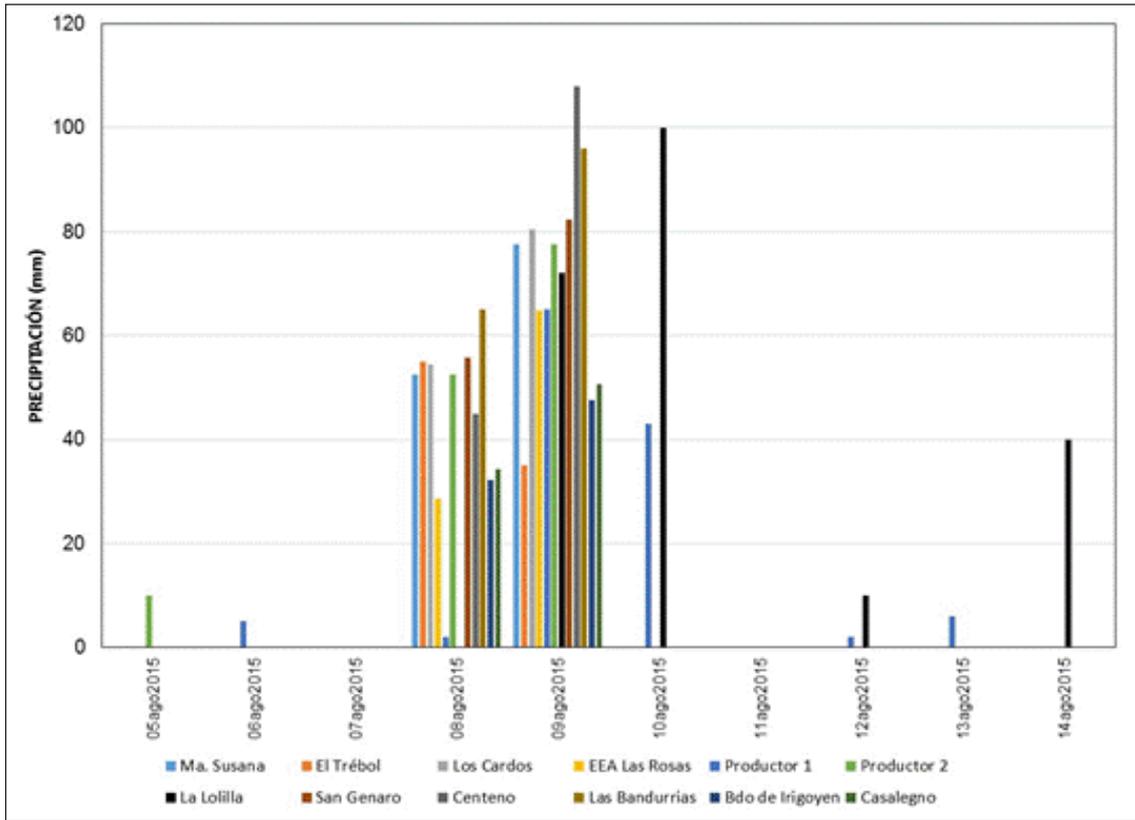


Figura 4. Hietogramas (mm) de las estaciones. Tormenta agosto 2015

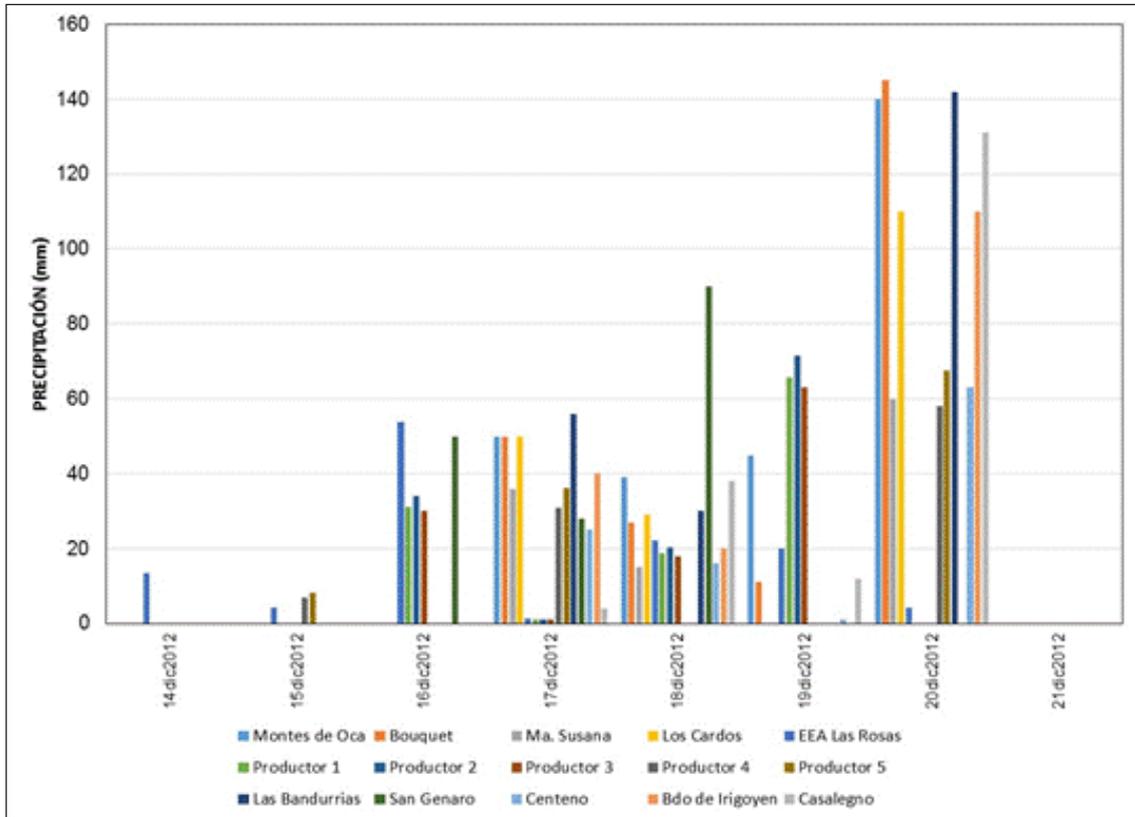


Figura 5. Hietogramas (mm) de las estaciones. Tormenta diciembre 2012

Modelación hidrológica con HEC-HMS

Para la discretización de la cuenca se consideraron los paleocauces extendidos al oeste de la cuenca superior que representaron la trayectoria del escurrimiento natural, resultando subcuencas más alargadas que en las cuencas media y baja, principalmente en la margen derecha del arroyo. La Figura 6 muestra la topología de la cuenca del arroyo

Las Turbias utilizada para implementar el modelo hidrológico.

Para la subdivisión de la cuenca además de las características hidrológicas del escurrimiento de la cuenca se tuvo en cuenta la localización de información disponible para definir los puntos de control empleados en la calibración.

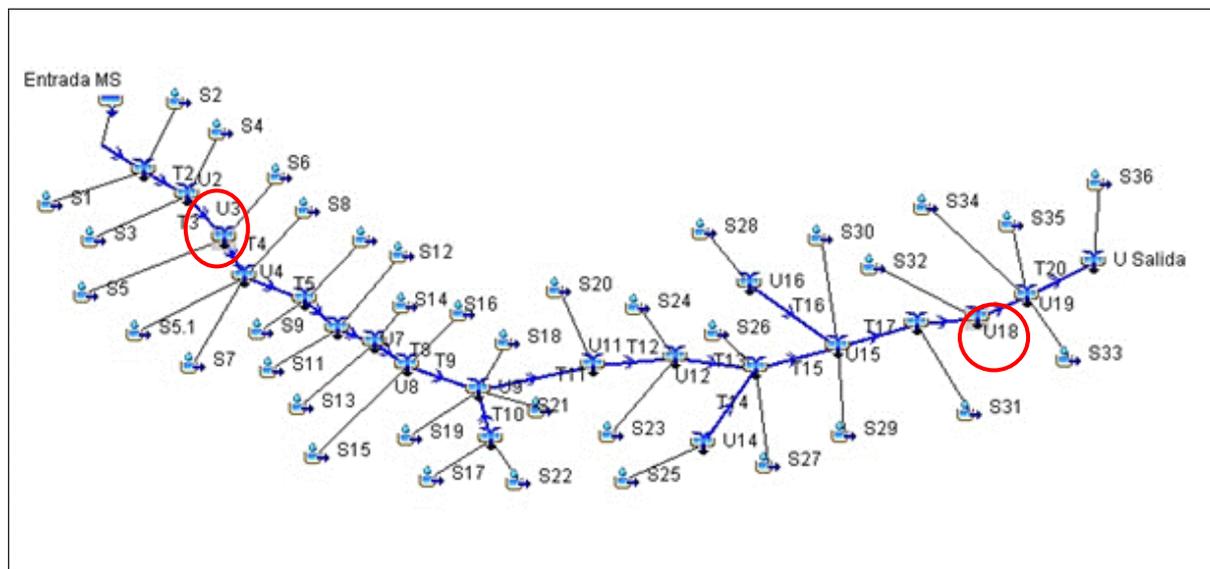


Figura 6. Topología de la cuenca en el modelo HEC- HMS

Las características físicas de las subcuencas se calcularon de la base cartográfica disponible en formato digital, a través de un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD), que permite trazar longitudes de escurrimiento y medir distancias, superficies, entre otras dimensiones.

Las pendientes medias de las subcuencas se calcularon promediando las pendientes de los diferentes recorridos del agua según la topografía superficial.

Para calcular el tiempo de concentración de las subcuencas se promediaron diferentes métodos: Kirpich, Témez, Giandotti, Dooge (Vélez Upegui y Botero Gutiérrez, 2010; Dooge, 1973; Chow, 1994), que tienen en cuenta la longitud de escurrimiento, pendiente o desnivel y el área de la subcuenca.

La Tabla 1 presenta las características físicas de las 36 subcuencas y 20 tramos de propagación.

La simulación matemática hidrológica se realizó adoptando del HEC-HMS los siguientes algoritmos:

- Modelo meteorológico: calcula el hietograma medio mediante la ponderación por polígonos de Thiessen.
- Pérdidas por infiltración: Método de Curva Número (CN) del S.C.S.

- Transformación lluvia-caudal por el método del hidrograma unitario de Clark.
- Propagación en tramos de cauce: Método de Muskingum Cunge.

Los datos de entrada son diarios y el paso de tiempo de simulación del modelo es $dt=1$ h.

Para propagar por el método de Muskingum Cunge se poseían los datos de perfiles transversales del cauce principal, relevados por el MIT. En el caso de afluentes los perfiles se reconstruyeron con las curvas de nivel de la base cartográfica disponible.

Parámetros del modelo hidrológico – Condición inicial

La simulación hidrológica generó los hidrogramas de referencia iniciales del tramo de propagación seleccionado para el modelo hidrodinámico y corresponden a las uniones U3 que es la condición de borde de AA y la U18 como condición de borde de aa (Figura 6). El hidrograma de entrada al tramo (en U3) para el escenario 2012 se muestra en la Figura 7 y la Figura 8 presenta el hidrograma de salida del tramo (U18) para la tormenta de agosto de 2015.

Tabla 1. Características físicas de las cuencas y de los tramos

Subcuenca	Área [km ²]	Pendiente media	Tiempo de concentración [hs]	Tramo	L (km)	Δh [m]	Pendiente
1	28,920	0,00124	11,23	T1	2,62	1,94	0,0007
2	7,192	0,00167	4,86	T2	1,72	0,79	0,0005
3	36,382	0,00086	10,07	T3	2,97	1,33	0,0004
4	9,050	0,00105	6,12	T4	3,26	1,45	0,0004
5	38,928	0,00083	11,06	T5	1,54	0,54	0,0003
5.1	3,508	0,00203	3,09	T6	2,66	2,60	0,0010
6	17,684	0,00084	8,80	T7	2,13	2,05	0,0010
7	48,135	0,00080	9,21	T8	1,84	1,84	0,0010
8	17,592	0,00050	9,96	T9	1,61	1,57	0,0010
9	1,208	0,00185	2,49	T10	0,97	1,45	0,0015
10	19,540	0,00095	8,52	T11	5,73	4,44	0,0008
11	27,554	0,00141	7,90	T12	3,12	4,33	0,0014
12	26,699	0,00088	6,88	T13	10,80	18,17	0,0017
13	25,962	0,00132	8,29	T14	10,30	30,00	0,0029
14	3,435	0,00149	3,21	T15	4,43	4,39	0,0010
15	46,469	0,00115	9,48	T16	5,04	6,89	0,0014
16	17,174	0,00164	4,48	T17	8,28	7,20	0,0009
17	31,431	0,00184	8,00	T18	9,58	9,49	0,0010
18	4,174	0,00347	3,35	T19	6,99	1,42	0,0002
19	4,188	0,00395	3,46	T20	6,78	14,50	0,0021
20	24,669	0,00385	5,24				
21	0,885	0,00671	2,28				
22	68,209	0,00216	9,82				
23	70,288	0,00233	10,29				
24	3,374	0,01010	1,85				
25	23,834	0,00258	5,59				
26	22,088	0,00544	6,24				
27	20,321	0,00453	5,05				
28	54,850	0,00407	6,77				
29	45,838	0,00489	5,78				
30	22,951	0,00182	6,17				
31	54,758	0,00175	8,53				
32	41,459	0,00185	8,19				
33	18,153	0,00055	9,30				
34	40,888	0,00115	10,03				
35	19,382	0,00027	9,21				
36	24,141	0,00286	5,79				
Área Total (km ²)	971,312						

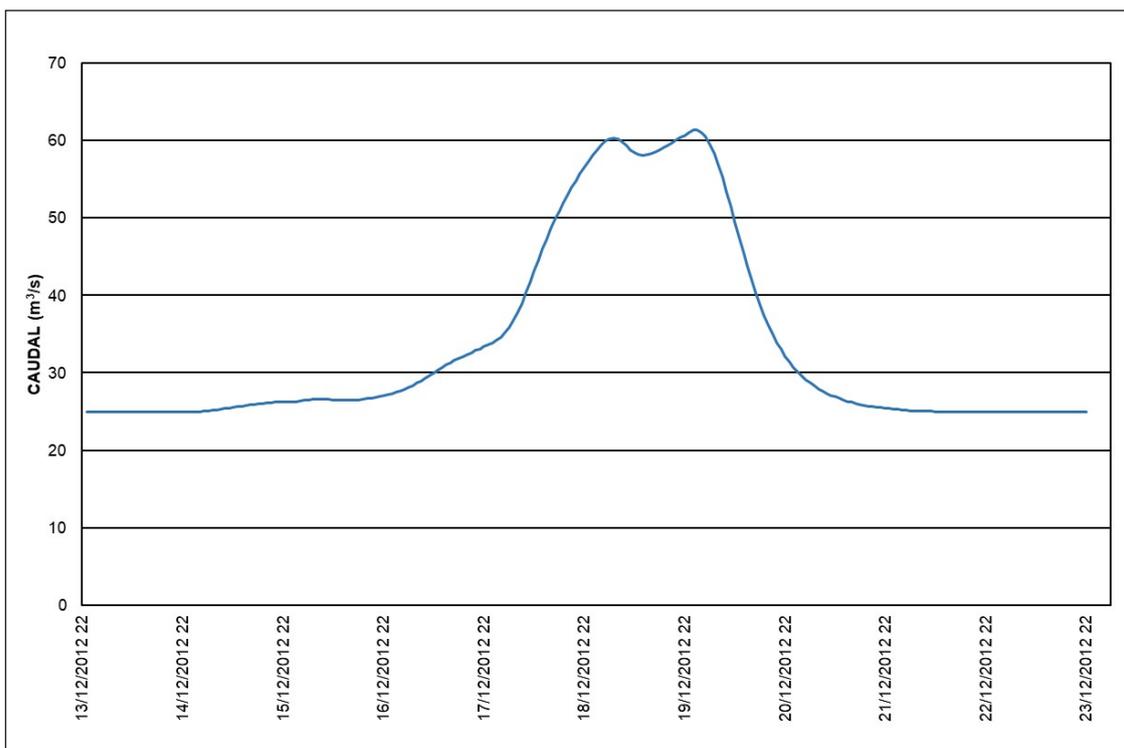


Figura 7. Caudal (m³/s) de entrada al tramo en U3. Diciembre de 2012

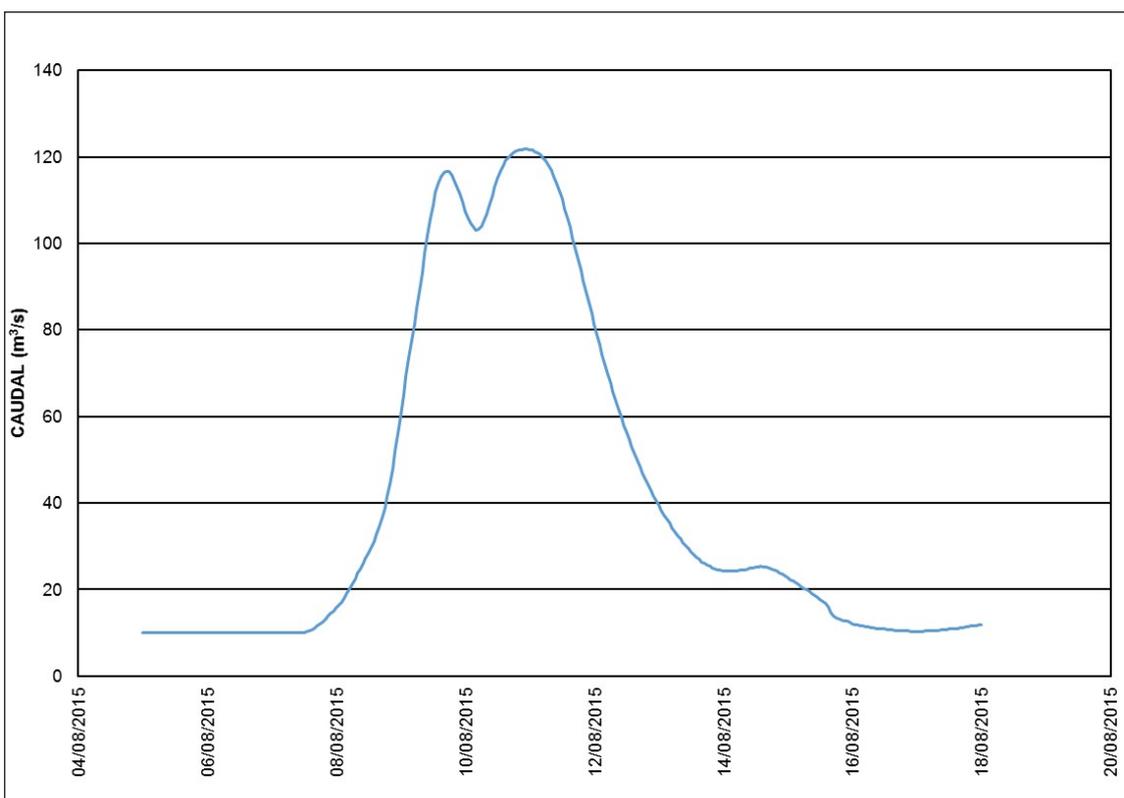


Figura 8. Caudal (m³/s) de salida del tramo en U18. Agosto de 2015

Los valores de CN se adoptaron inicialmente entre 55 y 62 ponderando entre pasturas y un porcentaje de praderas con tipo de suelo B (tasa de infiltración media) para el escenario de 2015 y cambiando al suelo de tipo D (tasa de infiltración muy baja y alto potencial de escurrimiento) con un aumento en valores de CN del 10 a 20% promedio para el escenario de

2012. Los coeficientes de almacenamiento R de Clark se consideraron entre 1 y 1,5 veces el tiempo de concentración. Las rugosidades de cauce nc y de planicie np para los perfiles de Muskingum Cunge del método de propagación fueron de 0,035 y 0,08 respectivamente. Las mismas rugosidades iniciales se utilizaron en los perfiles del tramo en el modelo HEC-RAS.

Para el escenario de 2012 se consideró un caudal de entrada de la cuenca superior a la altura de la localidad de María Susana de 25 m³/s como aporte hídrico aguas arriba que corresponde a una recurrencia entre 2 años y 5 años según el informe técnico de Siri (2015), porque desde el mes de octubre en la región ocurrieron fenómenos de precipitación generalizados que generaron condiciones de humedad antecedentes y anegamientos previos a la fecha del evento de validación seleccionado.

Modelación hidráulica con HEC-RAS

Como se mencionó anteriormente el arroyo Las Turbias no posee registros de series hidrométricas continuas, por lo que se decidió recurrir a productores y otras instituciones intermedias para recolectar información de diferentes características como marcas de niveles máximos de agua, anchos de planicie inundada, fotos, relatos que permitan

determinar las cotas hidrométricas para reproducir las crecidas de 2012 y 2015 y calibrar los parámetros de los modelos (Morresi et al, 2014).

Para implementar el modelo hidrodinámico lo más importante es disponer de buena calidad de la topografía (perfiles transversales del tramo). Con respecto a este punto es necesario aclarar que los perfiles transversales medidos y proporcionados por el MIT en promedio abarcaban un ancho de 20 m, insuficiente para propagar las crecidas seleccionadas. Al no disponerse de mediciones topográficas laterales al arroyo, los anchos de planicie de inundación de los perfiles transversales se extendieron hacia ambos lados del cauce alcanzando un ancho total promedio de 1000 m, interpolando entre las curvas de nivel regionales de la base cartográfica disponible. La Figura 9 muestra un perfil representativo del tramo de propagación desde margen izquierda (MI) a margen derecha (MD).

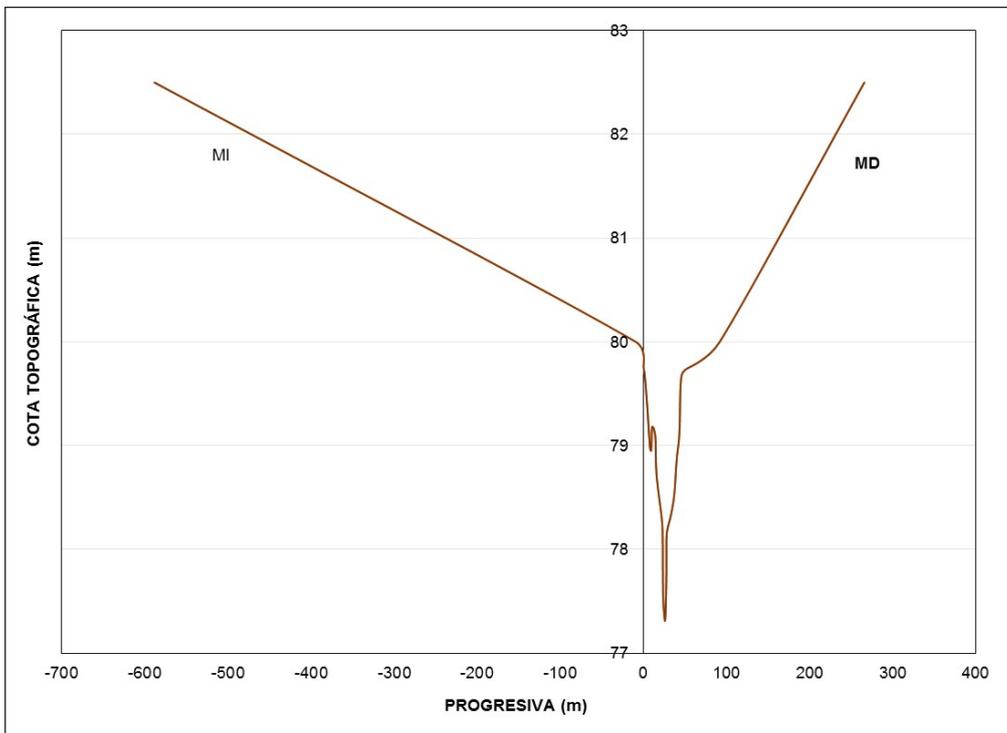


Figura 9. Sección transversal cauce y planicie.

Los perfiles transversales y las características estructurales de las obras hidráulicas existentes (alcantarillas y puentes) se representaron en el modelo geométrico del HEC-RAS en las progresivas correspondientes del tramo de propagación. La geometría del tramo requirió la interpolación de perfiles cada 100 m (Figura 10), que el modelo realiza automáticamente y denota con un asterisco (*) para diferenciarlos de los perfiles reales (datos).

Con las condiciones de borde AA (progresiva 68626 m), de aa (progresiva 14400 m) y laterales a lo largo del tramo de propagación (aportes laterales) obtenidos como hidrogramas de referencia con el modelo HEC-HMS, se corrió el modelo hidrodinámico, adoptando inicialmente rugosidades de Manning de 0,035 para cauce (*nc*) y de 0,08 para planicie de inundación (*np*).

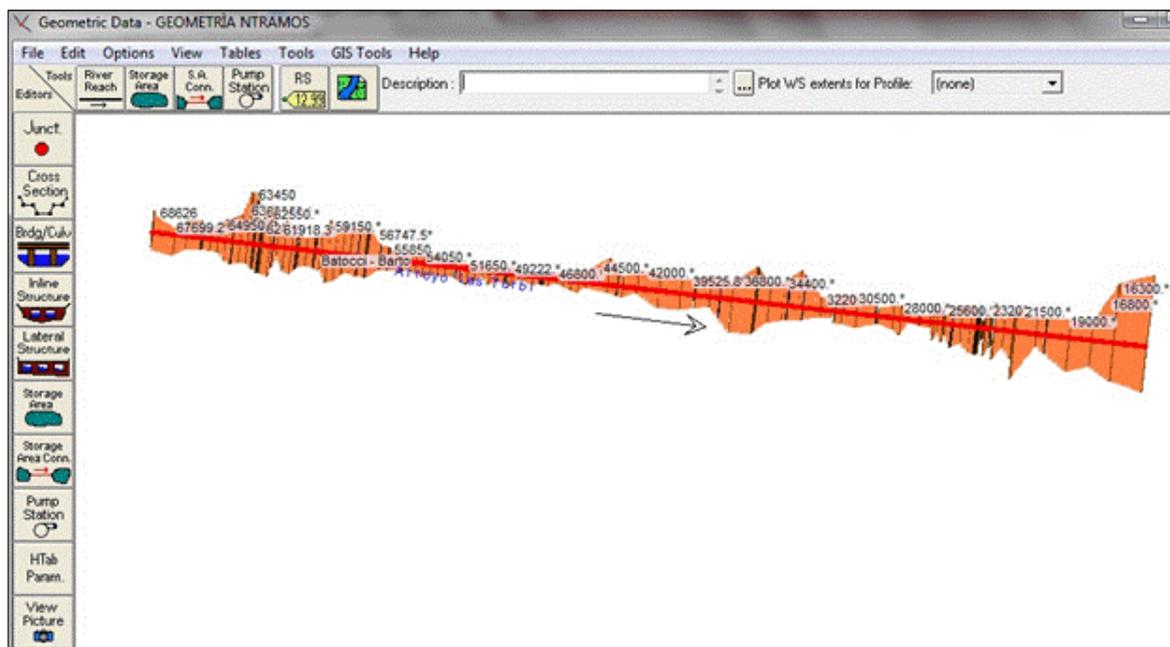


Figura 10. Tramo de propagación. Modelo HEC-RAS

Los datos hidrológicos de entrada son diarios, el tiempo de simulación del modelo HEC-RAS fue de 1 hora ($dt=1h$). La propagación en el tramo se realizó en la condición de “unsteadyflow”, es decir flujo impermanente. Debido a problemas de inestabilidad numérica del modelo, la condición de borde aguas abajo se modificó a la condición de profundidad normal con pendiente media del tramo.

Calibración y verificación de los modelos

Para la etapa de calibración se consideró el escenario de agosto 2015 dado que se pudo recorrer la cuenca y relevar información de interés próxima al pico de la crecida. Con los datos de las fotografías, marcas máximas de agua e información cualitativa brindada por los productores y las mediciones topográficas realizadas en campo se determinaron las cotas hidrométricas máximas y anchos de planicies inundadas en algunas progresivas intermedias del tramo. Debido a la incertidumbre de datos de los anchos de planicies de inundación de los perfiles transversales, la calibración de los parámetros del modelo HEC-RAS se realizó respecto de las cotas hidrométricas de inundación (cotas del pelo de agua) consideradas como únicos datos observados confiables.

La calibración de los modelos, se realizó un proceso iterativo de ajuste simultáneo. El proceso de ajuste por prueba y error comienza por el modelo hidráulico, las modificaciones de los parámetros se introducen en el modelo hidrológico, generando otros hidrogramas de referencia que son las nuevas condiciones de borde AA, aa y laterales en el modelo hidráulico repitiéndose el proceso hasta lograr el ajuste aceptable de las cotas hidrométricas simuladas en el modelo hidráulico con las observadas. La rugosidad

de planicie np fue modificada por tramos, siendo el parámetro de calibración más sensible por ser predominante respecto de la rugosidad de cauce nc . En el método de propagación del modelo HEC-HMS se consideraron las mismas modificaciones de np de los perfiles transversales ajustados en HEC-RAS. El CN se modificó para complementar la variación de los caudales generados por las subcuencas en los puntos de control seleccionados, comparándolos con los caudales calculados en el modelo hidrodinámico.

Los valores de CN luego de la calibración son en promedio 55 para el escenario de simulación 2015 y se corresponden con humedad antecedente en Condición II (suelos con capacidad de campo) y Grupo Hidrológico B con potencial de escurrimiento medio, variando la cobertura vegetal entre cultivo en hileras, pastizales y praderas. Para el escenario 2012, los valores de CN se aumentaron entre 70 y 75 que corresponde a la Condición III (saturado) (USDA, 2004; Fatorelli y L Fernández, 2011).

Los coeficientes de rugosidad luego de la calibración para planicies de inundación están en el rango de 0,05 a 0,13. Los valores de np mayores a 0,1 son coeficientes que representan planicies de inundación con árboles y vegetación densa y corresponden a los tramos cercanos a los puentes principales de las rutas provincial N° 13 (RP 13) y nacional N° 34 (RN 34), (Arcement y Schneider, 1989).

La verificación se realizó para el escenario de diciembre de 2012, utilizando la misma geometría en ambos modelos y realizando el mismo proceso iterativo. En este escenario debieron aumentarse los valores de CN debido a la condición más húmeda de la cuenca por precipitaciones antecedentes. Las Tablas 2 y 3 muestran los errores de la calibración y validación del modelo hidrodinámico, calculados respecto a las cotas del pelo de agua observadas.

Tabla 2. Resultados de la calibración. Escenario agosto de 2015

Progresiva (m)	Cota pelo agua observada (m)	Cota pelo agua calibrada (m)	Error cota (m)	Error relativo cota (%)
65850	100,93	101,04	-0,11	-0,11
63850	100,13	100,74	-0,61	-0,61
62250	99,46	99,28	0,18	0,18
54994	92,31	92,31	0	0,00
51035	88,22	88,45	-0,23	-0,26
47485 RP 13	84,9	86,22	-1,32	-1,55
37678	68,82	68,69	0,13	0,19
33167	62,86	62,78	0,08	0,13
29149	59,45	59,42	0,03	0,05
23657 RN 34	56,09	55,89	0,20	0,36
22856	53,57	53,66	-0,09	-0,17
17300	48,94	48,88	0,06	0,12

Tabla 3. Resultados de la validación. Escenario diciembre de 2012

Progresiva (m)	Cota pelo agua observada (m)	Cota pelo agua calibrada (m)	Error cota (m)	Error relativo cota (%)
65850	101,18	101,26	-0,08	-0,08
63850	100,077	100,73	-0,65	-0,65
63152	99,28	100,03	-0,75	-0,76
51035	88,36	88,69	-0,33	-0,37
47485 RP 13	87	86,54	0,46	0,53
43265	79,65	78,57	1,08	1,36
41100	75,06	74,98	0,08	0,11
39069	72,26	72,31	-0,05	-0,07
23657 RN 34	55,8	56,58	-0,78	-1,40
22200	53,54	53,49	0,05	0,09
15300	46,41	46,58	-0,17	-0,37

Algunas progresivas del escenario de validación (2012) son diferentes del escenario de calibración (2015) ya que depende de los puntos de control de los que se disponía de datos observados.

Los errores de las cotas hidrométricas varían entre 0 m y 1,32 m para el escenario de calibración 2015 mientras que para el escenario de validación 2012 el rango de errores fue entre 0,05 m y 1,08 m, tomados en valor absoluto.

En la crecida de 2015 la RP 13 presenta el mayor error respecto de las demás progresivas analizadas

(mayor al 1 %) y en la RN 34 el error fue de 20 cm. En el escenario 2012 los errores mayores se presentaron en la RN 34 y en la progresiva 43265 (mayor al 1 %) y en RP 13 de 46 cm.

Si se adopta una tolerancia de diferencia aceptable de 20 cm, el escenario 2015 presenta 9 progresivas con ajuste aceptable sobre un total de 12 puntos de control (75 %), mientras que el escenario 2012 arrojó el 50% de ajuste aceptable. En la Tabla 4 se presentan los parámetros hidráulicos en las progresivas de control para el escenario de simulación agosto de 2015.

Tabla 4. Características hidráulicas de simulación del HEC-RAS. Agosto de 2015

Progresiva (m)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente Energía	Velocidad (m/s)	Ancho (m)	Nº Froude
65850	57,32	0,0002	0,53	501,54	0,13
63850	73,61	0,000035	0,27	1066,72	0,06
62250	78,34	0,00061	1,13	694,44	0,25
54994	125,46	0,000056	0,39	621,73	0,08
51035	125,05	0,000524	1,35	244,83	0,25
47485	127	0,000184	0,9	487,85	0,15
37678	119,02	0,000732	1,01	2101,54	0,26
33167	122,69	0,000045	0,4	1524,03	0,07
29149	126,04	0,000809	1,29	542,44	0,28
23657	121,96	0,000135	0,71	1301,03	0,12
22856	124,53	0,001308	1,68	461,05	0,33
17300	123,26	0,001344	1,67	1230,05	0,35

La Figura 11 muestra el perfil longitudinal del pelo de agua del tramo en el escenario 2012, donde puede

apreciarse que en las secciones de obras hidráulicas se destacan los desniveles del pelo de agua.

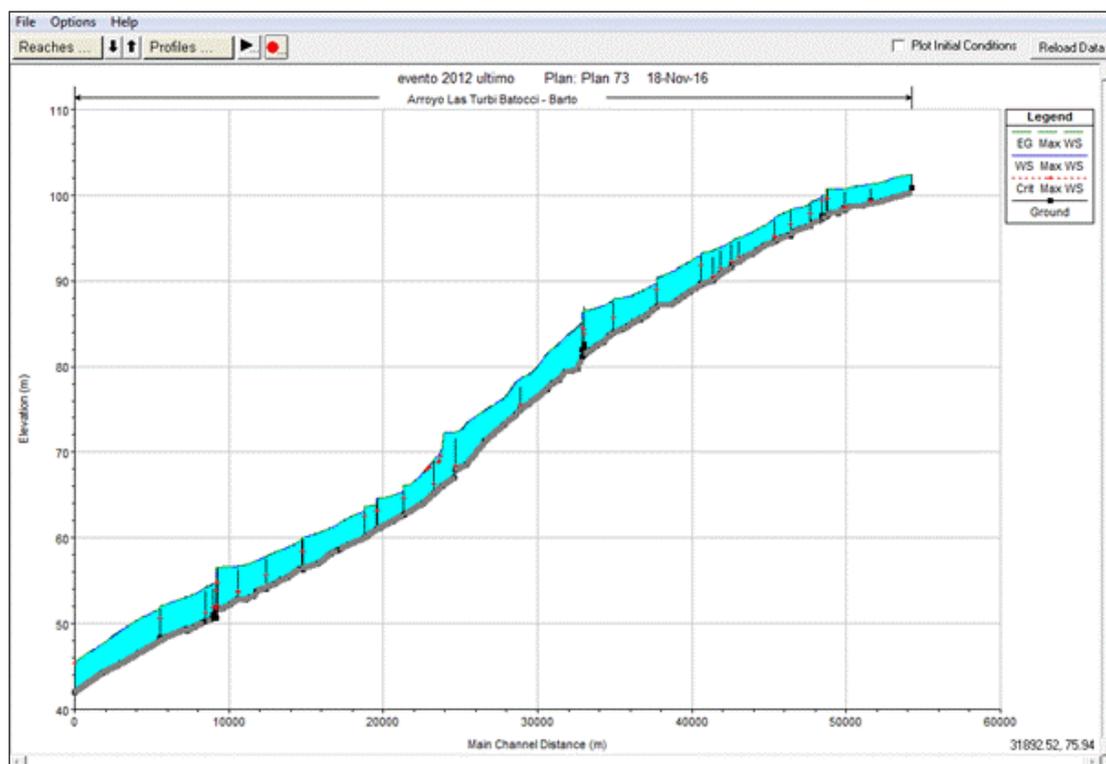


Figura 11. Perfil longitudinal de inundación. Crecida diciembre de 2012

En la Tabla 4 se observa que el régimen de escurrimiento es subcrítico, condición adecuada del flujo para la simulación con onda dinámica y respecto a los anchos de inundación se observa que en algunas progresivas supera los anchos medidos en campo (promedio de 400 m). El promedio de velocidad en el canal es cercano a 1 m/s.

CONCLUSIONES

La calibración de los modelos fue posible principalmente gracias a la información proporcionada por los productores de la cuenca por lo que es importante incorporar estos datos a la información oficial. Los datos proporcionados por los productores e instituciones fueron considerados confiables.

El empleo conjunto de dos modelos matemáticos permitió complementar el proceso de calibración simultánea en casos donde no se dispone de una serie de registros históricos oficiales.

La propagación de las crecidas simuladas desbordó el cauce principal y el comportamiento hidráulico predominante en el movimiento del flujo es el de la planicie de inundación, siendo sus características los influentes principales en el movimiento del flujo.

Los valores de los parámetros obtenidos en los resultados de la calibración, se encuentran dentro del rango aceptable brindado por la bibliografía en cuencas rurales.

Los errores de las cotas hidrométricas en las distintas progresivas y las correspondientes a las rutas principales (RP 13 y RN 34) en los diferentes escenarios simulados, superan la tolerancia adoptada.

Una de las causas puede fundamentarse en que el modelo unidimensional no representa adecuadamente los efectos de la contracción de sección en el pelo de agua por la existencia de obras hidráulicas.

Se evidencia incertidumbre de datos en las planicies de inundación en diferentes perfiles transversales del tramo que generó diferencias significativas respecto de los anchos de planicie promedios medidos en campo.

En los últimos años en la cuenca se han realizado trabajos de canalización que pudieron haber influido en la modificación de la topografía de los perfiles transversales originales implementados en el modelo hidráulico.

Se destaca la necesidad de que los organismos públicos pertinentes realicen mediciones más detalladas y extensas en las planicies de inundación así como el control de la dinámica antrópica de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los productores por la valiosa información ofrecida y la buena predisposición para colaborar en la localización de los lugares más afectados. A las instituciones intermedias AFA por brindar información y realizar gestiones para posibilitar los encuentros con productores. A las autoridades gubernamentales locales de Las Rosas, Los Cardos, San Genaro y Centeno. y

Al Ministerio de Infraestructura y Transporte de la provincia de Santa Fe y al Servicio de Catastro e Información Territorial por la información técnica y básica suministrada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arcement, G. J. y Schneider, V.R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological

Survey Water-Supply Paper 2339. Denver: United States Government Printing Office. Recuperado de: <http://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf> (23/05/17).

Biancotti, E., Marcus, R., Morresi, M. y Gardiol, M. 2015. Análisis pluviométrico de estaciones oficiales y particulares. Influencia en la determinación de hietogramas: 11.CONAGUA 2015. Paraná, Entre Ríos.11 pág. Libro de Resúmenes: p. 108.ISBN 978-987-27407-4-0.

Calcagno, A.; Mendiburo, N. y Novillo, M. 2000. Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Argentina. World Water Vision. <http://www.eclac.cl/drni/proyectos/samtac/inar00200.pdf>.

Chandler, J., Wackrow, R., Sun, X., Shiono, K. y Rameshwaran, P. 2008. Measuring Dynamic and flooding river surface by close range digital Photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008.

Chow, Ven T.; Maidment, D. y Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Santa Fe de Bogotá Colombia: McGraw-Hill Interamericana. ISBN: 958-600-171-7.

Consejo Federal de Inversiones, (CFI). 2001. Estudios hidrológicos e hidráulicos del evento ocurrido en Cañada de Gómez el 22/11/2000. Reporte de Gioria R., Santa Fe.

Dooge, J. 1973. Linear Theory of Hydrologic Systems. Technical Bulletin No. 1468 of the Agricultural Research Service, U.S.D.A. Washington, D.C., U.S.A.: p. 339.

Fatorelli, S. y Fernández, P. 2011. Diseño hidrológico. 2º Edición en español. Edición digital. ISBN: 978-987-05-2738-2. WASA-GN. Recuperado de: http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf (24/10/2014).

Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medioambiente (MASPyMA). 2009. Reacondicionamiento del canal Pilar, obras de arte y camino comunal. Departamento Las Colonias. Provincia de Santa Fe. Subsecretaría de Planificación y Gestión.

Ministerio de Planificación Federal (2008). Argentina. Plan Nacional Federal de los Recursos Hídricos. Buenos Aires: Ediciones Gráficas Especiales SA, 1º edición, ISBN 978-987-23585-3-2.

Morresi, M., Gardiol, M., Marcus, R. y Biancotti, E. 2014. Georreferenciación de la información topográfica e hidrológica de la cuenca del arroyo Carrizales-Monje. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe, Argentina, ISSN Nº 978-987-692-039-1. CDD: p. 551

Palacio, C., García, F. y García, U. 2010. Calibración de un modelo hidrodinámico 2d para la bahía de Cartagena, Medellín. DYNA, Año 77, Nro. 164:pp. 152166. ISSN 00127353.

Palman, L. 2012. Reacondicionamiento del canal principal arroyo Las Turbias. Informe preliminar del

Proyecto final de carrera de grado. FICH. UNL Santa Fe: p. 39.

Samad, M., Ahmad, A., Hashim, K. y Ishak, N. 2010. Assessment of digital camera for mapping stream using close range photogrammetric technique. 6th International Colloquium on Signal Processing y Its Applications (CSPA):pp. 207-211.

Subsecretaría de Proyectos de Inversión y Financiamiento Externo. (SIPFE). 2007. Readequación de las obras de mitigación contra inundaciones y estabilización de barrancas en la zona este de la ciudad de San Javier. Planteo de alternativas de anteproyecto. Ministerio de Hacienda y Finanzas de la provincia de Santa Fe.

Siri, J. 2015. Informe sobre el análisis y estudio parcial del proyecto de reacondicionamiento y extensión del canal del arroyo "Las Turbias". Informe Técnico: p. 23.

Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación, 2007a. Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos – Informe del Taller Nacional. Ciudad de Buenos Aires. <http://www.hidricosargentina.gov.ar/InfTallerNac.pdf>

Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación, 2007b. Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos – Informe Taller en provincia de Santa Fe. Santa Fe. Consejo Hídrico Federal, Ministerio de Asuntos Hídricos de la provincia de Santa Fe. http://www.hidricosargentina.gov.ar/TALLER_SANTA_FE.pdf

United States Army Corps of Engineers. (USACE). 2014. Software HEC- HMS V. 4.0 Y HEC-RAS, V. 4.1 Downloads: <http://www.hec.usace.army.mil/software/>
United States Department of Agriculture (USDA). 2004. *Hydrologic Soil-Cover Complexes*. Chapter 9. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook (NEH). Natural Resources Conservation Service. Recuperado de: [https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba.\(21/2/2017\)](https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba.(21/2/2017))

Vélez Upegui, J. y Botero Gutiérrez, A. 2010. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, Año 78, Nro. 165: pp. 58-71. Medellín, Colombia. Recuperado de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640/39138> (20/02/2017).

Wachrow, R.; Chandler, J. y Gardner, T. 2008. Minimising systematic errors in DEMs caused by an inaccurate lens model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing. 2008.

Wenchao, S., Hiroshi, I. y Bastola S. 2010. Towards improving river discharge estimation in ungauged basins: calibration of rainfall-runoff models based on satellite observations of river flow width at basin outlet. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*.

ZONIFICACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN URUGUAY: UNA GUÍA ORIENTATIVA PARA SU GESTIÓN Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

ZONING OF THE GUARANÍ AQUIFER SYSTEM IN URUGUAY: A SUGGESTED GUIDE FOR ITS ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AND PROTECTION

Veroslavsky, Gerardo¹; Manganelli, Alberto²

Resumen

Se propone la zonificación del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay, sobre la base de criterios geológicos, hidrogeológicos y de usos del recurso, con el propósito de generar pautas que puedan ser consideradas en la gestión y protección ambiental del recurso. Se definen y caracterizan tres zonas, a saber: i) la Zona A, que incluye el área de afloramiento de las unidades físicas que componen el acuífero sumado a un área de seguridad o buffer. Constituye el área de mayor vulnerabilidad y sensibilidad ambiental, siendo además la fuente más importante de agua subterránea para el abastecimiento de la población; ii) la Zona B donde el acuífero se desarrolla a profundidades variables que oscilan desde algunos metros a centenas de metros y se encuentra casi totalmente protegido por los basaltos, proponiéndose a su vez su subdivisión en dos Subzonas (b1 – b2) sobre la base de la capacidad de recarga del SAG a través de los basaltos. Este conjunto, sumado a aspectos económicos y operativos, condiciona su actual explotación al mismo tiempo que limita el riesgo de contaminación, siendo la naturaleza del acuífero poco conocida en esta zona; y iii) la Zona C, definida como la región con potencial surgencia. En esta área, el acuífero está protegido por los mayores espesores basálticos, por lo que la posibilidad de afectación por las actividades antrópicas de la superficie del terreno es nula, a la vez que presenta las mejores condiciones para uso termal por sus caudales, temperaturas y posibilidad de surgencia. Con esta propuesta se intenta contribuir, desde el ámbito académico, con lineamientos y herramientas que brinden, a las instituciones gestoras y los usuarios del agua subterránea, elementos que sustenten una adecuada gobernanza del acuífero.

Palabras clave: Sistema Acuífero Guaraní, Zonificación, Gestión, Uruguay.

Abstract

A zoning of the Guaraní Aquifer System in Uruguay is proposed based on geological, hydrogeological and resource uses criteria, with the purpose of generating guidelines that can be considered in the management and environmental protection of this resource. Three zones are defined and characterized, namely: i) Zone A, which includes the outcrop area of the physical units that make up the aquifer added to a buffer or security area. It constitutes the area of greatest vulnerability and environmental sensitivity, being also the most important source of groundwater for the supply of the population; Zone B where the aquifer appears at varying depths ranging from a few meters to hundreds of meters and is almost completely protected by basalts. It is proposed to subdivide it into two Subzones (b1 - b2) based on the recharge capacity of the SAG through the basalts. This set, together with the economic and operational aspects influence their current operating conditions while limiting the risk of contamination. The nature of the aquifer is little known in this area; and iii) Zone C, defined as the region with potential artesianism. In this area the aquifer is protected by the greatest basaltic thickness, so the possibility of affectation by anthropic activities on the surface of the land is null, at the same time, it presents the best conditions for thermal use due to its yield, temperatures and possibility of upwelling. The proposal it is intended to contribute, from the academic sphere, with guidelines and tools that provide, to the managing institutions and the users of groundwater, elements that sustain an adequate governance of the aquifer.

Keywords: Guarani Aquifer System, Zoning, Management, Uruguay.

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es un acuífero transfronterizo localizado en la región occidental del continente Sudamericano que se extiende entre los paralelos 16°S y 32°S y los meridianos 47°W y 60°W, y ocupa un área total de 1.087.879,5 km² (Gastmans *et al.*, 2012). Sus recursos hídricos los

comparten una población estimada en más 90 millones en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (Figura 1) y se estima que se extrae anualmente un volumen algo superior a los 1.000 millones de m³ (PEA, 2009). En Uruguay, el SAG abarca un área de 36.171 km² sobre la que viven aproximadamente 400.000 habitantes y se extrae un volumen

1 Departamento de Geología Sedimentaria y Aplicada, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo – Uruguay. E-mail: gerardo@fcien.edu.uy

2 Centro Regional para la Gestión del Agua Subterránea en América Latina y el Caribe (CeReGAS), Montevideo – Uruguay. E-mail: amanganelli@ceregas.org

aproximado a 25 millones de m³/año (DINAMIGE, 2009). Es aprovechado para diversos usos, entre los que se destacan: el suministro de agua potable a la población establecida sobre el área aflorante (ej.

ciudades de Rivera, Tranqueras); riego y consumo humano (ej. área de afloramientos y la “ventana” de Artigas); y su explotación en los centros turísticos termales sobre el Litoral del Río Uruguay (ej. Salto).

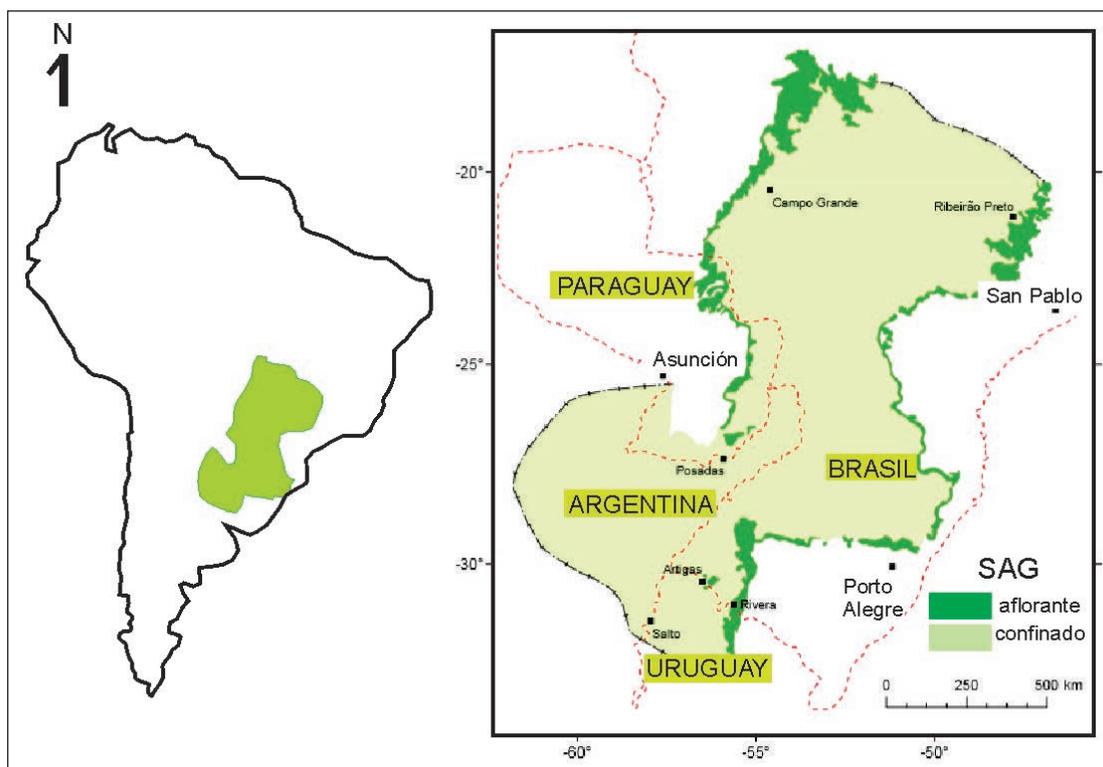


Figura 1. Izquierda: ubicación de las cuencas Paraná y Chacoparanense. Derecha: extensión del SAG señalando las áreas aflorantes y confinadas (modificado de Gastmans *et al.*, 2012).

El Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG) marcó un hito relevante en el conocimiento científico y técnico del SAG. Fue llevado adelante por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, financiado por *Global Environment Facility* (GEF) y ejecutado por la Organización de los Estados Americanos (OEA) con la implementación del Banco Mundial (BM). Además, cabe remarcar que buena parte de las actividades realizadas durante el transcurso del PSAG se beneficiaron por los aportes de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), del *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources* (BGR) y de la comunidad académica universitaria de los cuatro países. Una parte de los resultados alcanzados por el PSAG en Uruguay son presentados y discutidos en este trabajo.

En 2009, el PSAG presentó el Programa Estratégico de Acción (PEA) con el objetivo final de suministrar un marco de gestión para el manejo sostenible del SAG en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. El PEA definió las líneas de acciones más convenientes y adecuadas a ser ejecutadas en cada país, así como también, aquellas que requieren de la cooperación entre los cuatro países. Ese documento facilitó la comprensión, por parte de diversos actores, de que la gestión sustentable del agua subterránea debe

incluir tanto los niveles regionales y locales, así como los nacionales y transfronterizos.

En abril de 2010, los presidentes de los cuatro países firmaron el “Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní” con el propósito de ampliar los niveles de cooperación y coordinación respecto a un mayor conocimiento científico sobre el Sistema Acuífero y a la gestión responsable de sus recursos hídricos. El proceso de ratificación acaba de concluir en abril de 2018 y su entrada en vigor puede constituir un nuevo impulso que permita a los cuatro países avanzar en promover la conservación y aprovechamiento sustentable del SAG.

Más allá de los avances logrados en la comprensión pública sobre la necesidad de una gestión sustentable, cuando se menciona el “Acuífero Guaraní” se lo asocia con una serie de características naturales que no distinguen la ubicación geográfica y, por lo tanto, sus especificidades. Si bien se reconoce un grado de homogeneidad en el SAG, es obvio que no es posible extrapolar todas sus cualidades regionales a una escala local cuando el objetivo es la gestión del recurso. Por ejemplo, sigue siendo corriente que cuando se habla del SAG en temas de contaminación, explotación, protección ambiental, restricciones en su uso o se lo menciona como una fuente de agua para consumo humano, no siempre se repara en sus

características específicas de la localidad o región considerada.

La propuesta de zonificación del SAG en Uruguay que aquí se ensaya pretende contemplar esas especificidades antes señaladas, con el propósito de contribuir, desde el ámbito académico - técnico, con lineamientos y herramientas que brinden a las instituciones gestoras y usuarios del agua subterránea, elementos para la gobernanza sostenible del Sistema Acuífero. En ese sentido, a partir de la revisión del modelo del funcionamiento del SAG en Uruguay se propone la zonificación del territorio que ocupa en tres zonas: Zona A; Zona B (con las Subzonas b1 y b2); y Zona C. Asimismo, el carácter transfronterizo del SAG fue contemplado en las orientaciones que se brindan para cada una de las tres zonas propuestas.

2. EL SAG REGIONAL

El SAG está constituido por un extenso conjunto de rocas sedimentarias, esencialmente arenosas, silicoclásticas, con buena porosidad y permeabilidad, depositadas durante el Mesozoico. Sus propiedades físicas le confieren características acuíferas que, por su notable extensión y continuidad en el subsuelo, lo hacen un vasto reservorio subterráneo que está presente en las cuencas Paraná y Chaco-Paraná (Figura 1). El SAG se desarrolla a profundidades variables, con un espesor promedio de 250 m con variaciones que oscilan desde los < 50 m a > 600 m, presentando valores de permeabilidad relativamente alta (Kh de 5 - 10 m/d) y una transmisividad media estimada en 300 m²/d (Foster *et al.*, 2009).

El SAG constituye un sistema hidrogeológico que, con excepción del área de afloramientos donde conforma un acuífero libre, se encuentra confinado y protegido naturalmente por rocas basálticas que constituyen una barrera natural prácticamente impermeable (Rocha, 1996). En buena medida, esa situación resulta responsable de que no se hayan identificado problemas de contaminación o explotación excesiva en el mismo, salvo algunas situaciones puntuales (PEA, 2009). A su vez, la cobertura basáltica también condiciona su explotación, incidiendo en los costos operativos de perforación, estableciendo limitaciones operativas y del equipamiento disponible donde presenta espesores importantes, así como otras veces ocasiona incertidumbres en cuanto al éxito del alumbramiento de agua.

Los límites físicos del SAG fueron definidos sobre la base de la distribución espacial de las unidades geológicas que lo componen (Lebac, 2008; Gastmans *et al.*, 2012). Las rocas sedimentarias que constituyen la base del SAG se apoyan sobre una superficie de discordancia regional labrada sobre un mosaico de unidades geológicas de diferente naturaleza y edad. A su vez, el techo del SAG está definido por los basaltos eocretácicos que ocupan un área de 1.000.000 km². Bajo esa definición, tanto

los basaltos suprayacentes al SAG (Pos-SAG) como las rocas sedimentarias paleozoicas infrayacentes (Pre-SAG) son excluidas como parte integrante de ese sistema hidrogeológico. Sin embargo, en varios sectores se reconocen las posibles relaciones de flujo de las aguas del SAG y los acuíferos del Pre-SAG (Lebac, 2018; Hirata *et al.*, 2009; Gastmans *et al.*, 2012), los que a su vez inciden en el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del mismo.

Los resultados alcanzados durante el PSAG permitieron demostrar que el SAG exhibe continuidad física entre los cuatro países que lo componen, por lo que constituye un acuífero transfronterizo. El flujo regional de las aguas subterráneas del SAG exhibe un *trend* de Norte hacia el Sur, que acompaña aproximadamente el eje de la Cuenca de Paraná. Según Araujo *et al.* (1995, 1999), Machado (2005) y Gastmans *et al.* (2012) ese patrón de flujo está influenciado por los principales rasgos tectónicos y estructurales de la cuenca, los que a su vez permiten la delimitación de grandes dominios hidrogeológicos (Foster *et al.*, 2009; Lebac, 2008). En lo que respecta a los tiempos de circulación de las aguas en el SAG, los estudios realizados mostraron que son elevados (flujo lento) y, en sectores de mayor confinamiento, extremadamente elevados llegando a postular la situación de no flujo en varios sectores (Hirata *et al.*, 2009; Lebac, 2008).

La caracterización hidroquímica regional del SAG muestra que sus aguas son de buena calidad, generalmente potables, de muy baja mineralización y renovables, aunque se han detectado en algunos sectores específicos anomalías de flúor, arsénico, cadmio, zinc, entre otros elementos, así como presenta amplios rangos de salinidad (Lebac, 2008). Esas variaciones y heterogeneidades naturales de las aguas están relacionadas al prolongado tránsito a través de sus extensas capas sedimentarias, otras a la profundidad por la que transitan y a la incidencia de aguas subterráneas más profundas en comunicación hidráulica con el sistema (Lebac, 2008; Manzano y Guimaraens, 2008). Las causas de varias de las anomalías geoquímicas que se detectan permanecen en buena medida desconocidas, aunque existen contribuciones que intentan explicar el origen anómalo de algunos elementos (Manzano y Guimaraens, 2008; Gastmans *et al.*, 2010, 2012).

Por último, en relación a los efectos transfronterizos del uso del SAG, los estudios realizados en los Proyectos Piloto identificaron en áreas de frontera que los mismos estarían restringidos a una franja del territorio que, en general, alcanza a pocas decenas de kilómetros, dependiendo de las características hidrodinámicas locales específicas (PEA, 2009). Se toma como ejemplo aquí, el cono de depresión generado por la extracción de agua en la región de Santana do Livramento y Rivera que, aunque de pequeña magnitud, cruza las fronteras entre Brasil y Uruguay afectando la dirección de flujos locales de aguas subterráneas del SAG.

3. EL SAG EN URUGUAY

Se describen y analizan aquí los principales aspectos geológicos, hidrogeológicos, de uso y normativos del SAG en el territorio uruguayo, los que son considerados, en buena medida, como sustento de la propuesta para su zonificación.

3.1. Geología

La geometría y extensión del SAG están definidas por la distribución espacial y deformación de las

unidades litoestratigráficas mesozoicas que, en continuidad física, o aparente continuidad, se distribuyen por encima de la discordancia permotriásica y por debajo de los basaltos cretácicos (Lebac, 2008). En la figura 2 se muestra la extensión del SAG en la Cuenca Norte, denominación local que adquiere en territorio uruguayo, la región más austral de la Cuenca Paraná. A continuación, se describen sucintamente las principales características litoestratigráficas y estructurales de la Cuenca Norte que revisten significación en el funcionamiento hidrodinámico e hidroquímico del SAG.

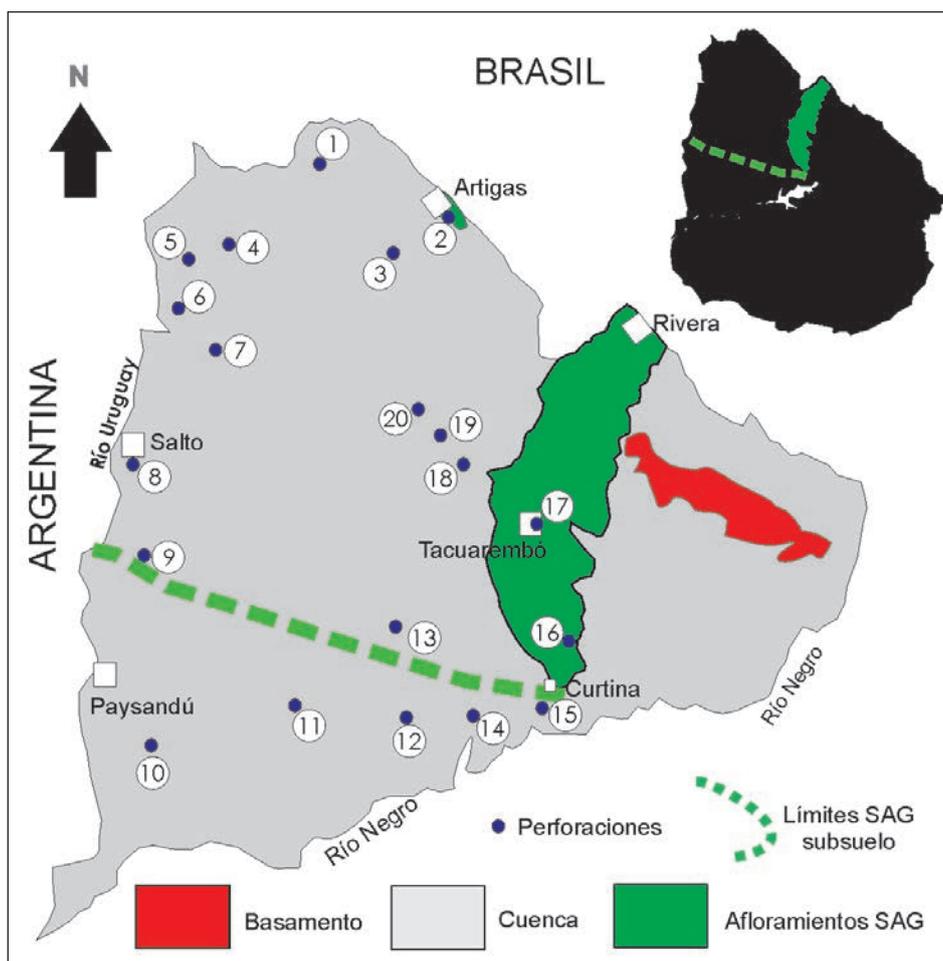


Figura 2. Extensión del SAG en la Cuenca Norte (modificado de Techera *et al.* 2017). Ubicación de los pozos mencionados en el trabajo: 1 – Yacaré, 2 – Artigas, 3 Pelado, 4 - Itacumbú, 5 – Gaspar, 6 – Belén, 7 Arapey, 8 - Salto, 9 – Quebracho, 10 – Paso Ullestie, 11 -Guichón, 12 – Salsipuedes, 13 – Cerro Padilla, 14 - Cardozo Chico, 15 – Achar, 16 – Los Cuadrados, 17 – Tacuarembó, 18 – Cañada del Charrúa, 19 -Pepe Núñez, 20 – Quintana (Fuente: de Santa Ana *et al.*, 2006; Soto, 2014; Marmisolle, 2015 y otros).

3.1.1. Unidades litoestratigráficas del SAG

Las unidades litoestratigráficas de la Cuenca Norte que componen el SAG, de techo a base, son las formaciones Rivera, Tacuarembó e Itacumbú. Las mismas se describen a continuación:

Formación Rivera (Cretácico Inferior)

Fue definida por Ferrando *et al.* (1987) con el propósito de reunir a las areniscas marrones a rojizas con estratificación cruzada (Figura 3) que integraban el Miembro Superior de la Formación Tacuarembó de Bossi *et al.* (1975). Está caracterizada por areniscas

finas a medias, marrones a rojizas, con buena a moderada selección, fundamentalmente cuarzosas a cuarzo – feldespáticas, con líticos asociados, con estratificación cruzada de gran porte y de alto ángulo como estructura sedimentaria principal. Se interpretan como campos de dunas depositados bajo condiciones climáticas cálidas y áridas (Ferrando *et al.*, 1987; Perea *et al.*, 2009; Bochi do Amarante, 2017).

Las relaciones estratigráficas de la Formación Rivera son en la base siempre con la Formación Tacuarembó, contacto que se expresa en una superficie erosiva suavemente ondulada y, otras veces, por contactos netos horizontales a subhorizontales. Hacia el

techo, las areniscas de la Formación Rivera pasan a la Formación Arapey con la aparición del primer derrame basáltico; mientras que, en el área de afloramientos, la Formación Rivera puede aparecer cubierta por sedimentos cuaternarios.

El espesor promedio de la unidad es 30-40 m, con algunas variaciones extremas que pueden deberse a las dificultades de definir el contacto con la Formación Tacuarembó, aspecto que ha sido estudiado en muestras de pozos por Aguirre *et al.* (2008). Los espesores de la unidad se muestran en la Tabla 1. Por sus relaciones estratigráficas con las unidades infra y suprayacentes se asume para la Formación Rivera una edad Cretácico Inferior.



Figura 3. Vista general de las areniscas marrones a rojizas con estratificación cruzada de alto ángulo que integran la Formación Rivera. A la izquierda, ruta 5, 16 km al Norte de Tacuarembó, a la derecha, ruta 30 en la Bajada de Pena.

Formación Tacuarembó

(Jurásico Superior-Cretácico)

Litoestratigráficamente, corresponde a los términos litológicos que reúne el Miembro Inferior de la Formación Tacuarembó de Bossi *et al.* (1975) y Preciozzi *et al.* (1985). Reúne estratos de arenitas finas, a veces muy finas a finas, cuarzosas a cuarzo-feldespáticas, blanquecinas, de buena selección y escasa matriz (menos de 2%), mostrando una gran homogeneidad granulométrica y composicional. Ocasionalmente, se suceden intercalaciones de bancos de areniscas masivas muy finas a medias y pelitas, con tonalidades variadas, predominando las blanquecinas, rojizas y verdosas.

La estratificación horizontal paralela, a subhorizontal paralela, es la estructura dominante en la Formación Tacuarembó (Figura 4). Sin embargo, es común observar estratificaciones cruzadas, de tipo tabular – planar, tangencial y en artesa y, ocasionalmente, niveles de areniscas masivas intercalados a los estratos más conspicuos de areniscas. Las areniscas finas blanquecinas aparecen en estratos de marcada continuidad y tabularidad, cortados por geometrías

de canal donde se observan intraclastos y/o arenas más gruesas.

La Formación Tacuarembó es interpretada como una sucesión de depósitos fluviales y eólicos, conformando extensas planicies arenosas rasas asociadas a canales efímeros y/o permanentes (Bochi de Amarante, 2017). Estas planicies fluviales aparecen interdigitadas a depósitos eólicos, fundamentalmente sábanas de arena (*sand sheet*) y subordinadamente dunas e interdunas húmedas (Perea *et al.*, 2009).

Su múltiple contenido fosilífero (peces, moluscos, tortugas, cocodrilos, ostrácodos, coprolitos, conchostráceos, restos de tiburones dulceacuícolas y de dinosaurios), permite asignar a la Formación una edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior, así como también definir condiciones paleoambientales de humedad y disponibilidad de agua en el sistema (Perea *et al.*, 2009; Soto *et al.*, 2012; Mesa y Perea, 2015) distintas a las de la suprayacente Formación Rivera (clima árido).

Las relaciones estratigráficas de la Formación Tacuarembó en su base son de discordancia con

las formaciones Buena Vista y Yaguari (Pérmico Superior) y concordante con la Formación Itacumbú. Hacia el techo, la unidad muestra relaciones de discontinuidad estratigráfica con las areniscas de la Formación Rivera. La Formación Tacuarembó infrayace a los basaltos de la Formación Arapey en buena parte de la faja de afloramientos, particularmente, en la región centro sur, así como

esas relaciones estratigráficas son constatadas en pozos del noroeste de la cuenca.

El espesor medio de la Formación Tacuarembó es de 200 - 250 m, mostrando en amplios sectores una continuidad lateral con espesores casi constantes, sólo produciéndose un adelgazamiento de los espesores por erosión hacia la región aflorante y/o acuñamientos sobre algunos altos estructurales.



Figura 4. A la izquierda, vista general de la Formación Tacuarembó, areniscas finas y blancas con estratificación horizontal (ruta 26 al Este de Tacuarembó) y con estratificación cruzada en artesa asociadas a geometrías de canal (ruta 26 al Oeste de Tacuarembó).

Formación Itacumbú (Jurásico)

Su nombre deriva del pozo Itacumbú (NO10-I x-1), situado en la Cuchilla de Itacumbú, al Oeste del departamento de Artigas donde alcanza una potencia de 220m (profundidad 780-1000m). Su distribución en subsuelo se muestra en los pozos de la Tabla 1. Fue definida por de Santa Ana y Veroslavsky (2003) para agrupar a una sucesión de estratos de arenitas finas a muy finas, subfeldespáticas a feldespáticas, con abundante biotita y muscovita, blanquecinas a grisáceas, naranjas y marrones, algo silicificadas, a las que se intercalan estratos pelíticos y, ocasionales niveles arcillosos, margosos y carbonáticos.

Estas litologías fueron descritas en detalle por Aguirre *et al.* (2008) y cabe señalar que esta sucesión fue originalmente descrita y separada sobre la base de su comportamiento electrofaciológico (Figura 5) por González y de Santa Ana (1998) y asignada, genéricamente, al Triásico - Jurásico.

La Formación Itacumbú se apoya sobre los basaltos de la Formación Gaspar (pozo Gaspar) y en discordancia sobre la Formación Buena Vista en el resto de los pozos profundos del sector noroeste de la cuenca, mostrándose concordante con la suprayacente Formación Tacuarembó.

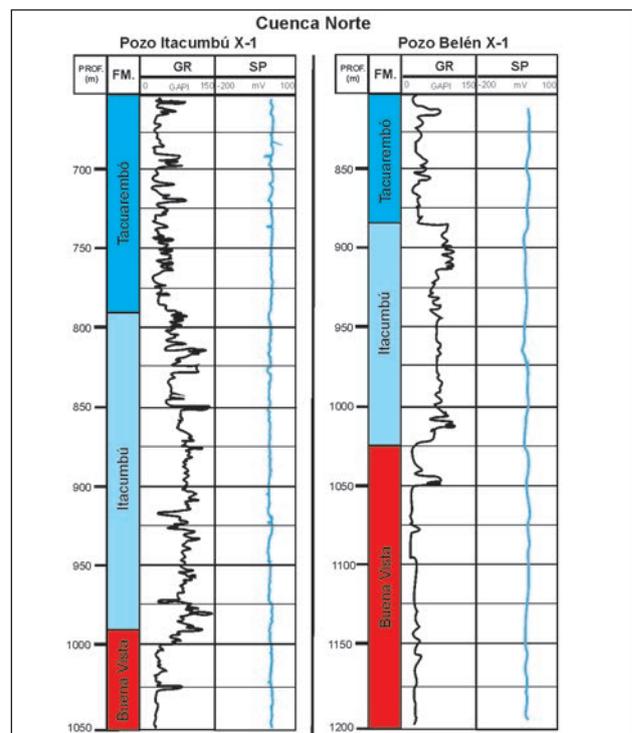


Figura 5. Diagramas de los pozos Itacumbú X-1 (650 a 1150 m) y Belén X-1 (750 a 1200m) de la Cuenca Norte (ver ubicación figura 2) que muestra el contraste en el comportamiento de las areniscas finas y pelitas de la Formación Itacumbú con respecto a las supra e infrayacentes formaciones Tacuarembó y Buena Vista en los registros de GR y SP (modificado de Ucha y de Santa Ana, 1990).

3.1.2 Configuración estructural

Los principales rasgos estructurales del subsuelo se reconocen a partir de la información gravimétrica, sísmica y magnetotélúrica, así como de un conjunto de perforaciones profundas que se dispone la Cuenca Norte (Ucha y de Santa Ana, 1990; de Santa Ana *et al.*, 2006; Oleaga, 2002; Rodríguez *et*

al., 2015; Marmisolle, 2015). En particular, el sector infrabasáltico noroeste exhibe como principales rasgos estructurales un conjunto de fuertes lineamientos y fallas que, con orientación general NW, los cuales controlan la configuración de altos y bajos, estructuración que a su vez es afectada, en sectores, por fallas NNW, NE y, subordinadamente NS (Figura 6).

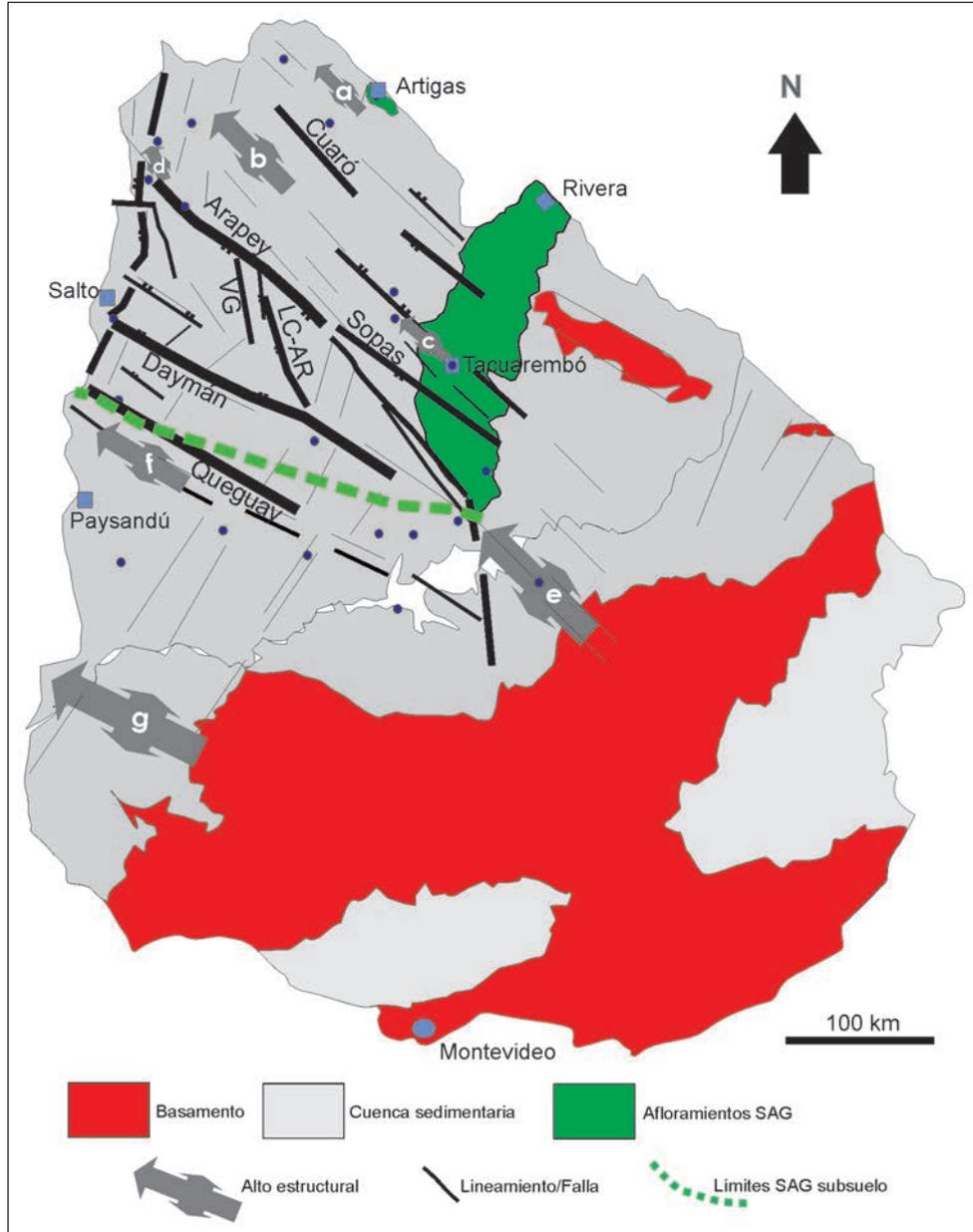


Figura 6. Principales elementos estructurales de la Cuenca Norte. Altos de: a) Cuareim, b) Paguero - Cuaró, c) Tacuarembó, d) Gaspar, f) Queguay, g) Mercedes. VG = Lineamientos Daymán, Arapey-Sopas, Valentín Grande; LC-AR= Fallas Arroyo Las Cañas – Arerunguá.

Asociados a los *trends* estructurales NW se desarrollan varios de altos estructurales que controlan la configuración de algunos depocentros vulcano-sedimentarios profundos. Los lineamientos NW, en la mayoría de los casos, controlan el curso de los principales ríos que desembocan en el río

Uruguay (Daymán, Arapey, Queguay). La figura 7 presenta diferentes cortes geológicos que permiten visualizar la configuración general del subsuelo de la Cuenca Norte, así como la distribución y geometría del SAG y sus relaciones con las unidades infra y suprayacentes.

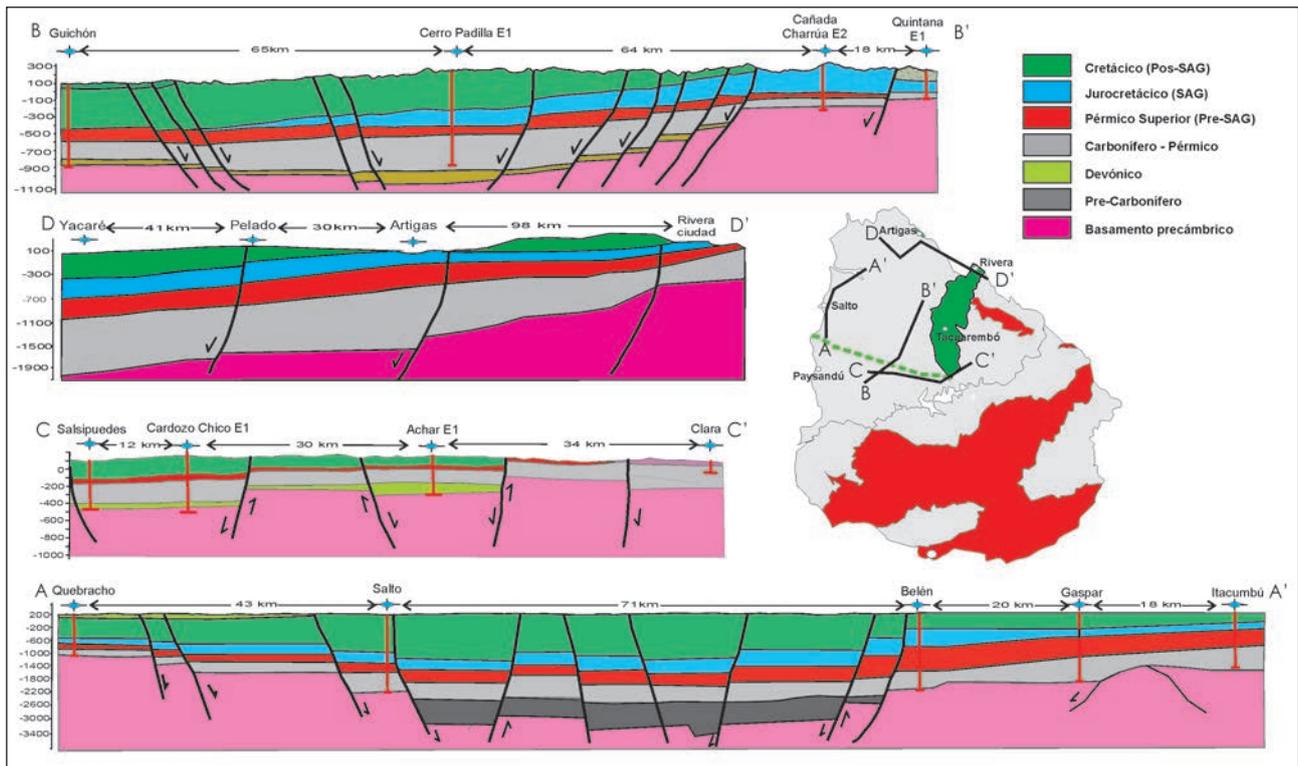


Figura 7. Cuatro cortes geológicos que muestran la configuración del SAG en el Cuenca Norte y brindan sustento a la propuesta de zonación del SAG (Fuente: Marmisolle, 2015; Ucha y de Santa Ana, 1990; de Santa Ana *et al.*, 2006).

Un rasgo estructural sobresaliente de la cuenca, que tiene una particular incidencia en el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del SAG, es el corredor estructural NW, descrito y caracterizado por Marmisolle (2015), que se desarrolla en la región centro-oeste y queda definido por los fallamientos Daymán y Arapey-Sopas. Este corredor muestra una profundización progresiva hacia el W-NW a través de un conjunto de fallas lítricas normales que se desarrollan en su interior, delimitando algunos bloques que poseen características diferentes. En particular, en el extremo Oeste del corredor, se ubica un bloque delimitado al Norte y Sur por las fallas Arapey y Daymán respectivamente, mientras que hacia el Este lo limita un *trend* de fallas NNE asociados a los Lineamientos Las Cañas – Arerunguá. Este bloque muestra en su sector occidental profundidades de basamento en torno a 3 500 m, fuertes anomalías gravimétricas positivas asociadas al basamento (Rodríguez *et al.*, 2015), la preservación de relictos sedimentarios pre-carboníferos (Marmisolle *et al.*, 2016), los mayores espesores de basaltos conocidos en la cuenca (más de 1000 m) con características petrológicas algo diferentes a los derrames del Norte (Bossi y Schipilov, 2007) así como un basculamiento hacia el Oeste (Bossi y Heide, 1970; Marmisolle, 2015).

En particular, se entiende que la falla Arapey constituye un rasgo de significación en la evolución tectónica y sedimentaria durante el Paleozoico y

Mesozoico de la cuenca, constituyendo así mismo un límite entre basamentos precámbricos de diferente naturaleza (Rodríguez *et al.*, 2015). La falla Arapey controló el emplazamiento del magmatismo cretácico, facilitando la salida y acumulación de mayores volúmenes de basaltos con fallamientos subverticales con rechazos de cientos de metros que afectaron la continuidad física del SAG en ese sector.

3.2. Hidrogeología

Los principales antecedentes del SAG en Uruguay refieren a las contribuciones de Montañó *et al.* (1998), Oleaga (2002), Montañó (2003), Collazo (2006), Gómez (2007) y Heinzen *et al.* (2003). El PSAG propició la realización de una exhaustiva recopilación de antecedentes y generó un volumen muy importante de datos e información que permitió avanzar significativamente en el conocimiento de la naturaleza del SAG y ajustar elementos que explican su comportamiento hidrodinámico e hidroquímico (Lebac, 2008; Manzano y Guimaraens, 2008; Gastmans *et al.*, 2012). Un nuevo mapa del SAG fue presentado por Techera *et al.* (2017) incluyendo información geológica e hidrogeológica más reciente. A partir de esas contribuciones y nuevos datos geológicos e hidrogeológicos se presenta aquí una actualización y revisión del modelo hidrogeológico conceptual del SAG.

Los límites del SAG en Uruguay fueron establecidos por Lebac (2008) y ajustados por Techera *et al.* (2017).

En superficie, el SAG está representado por las formaciones Tacuarembó y Rivera, las que conforman una larga y estrecha faja de 160 km por aproximadamente 30-35 km que, con dirección Norte – Sur, ocupa la región central de la Cuenca Norte (Figura 2). Otros pequeños afloramientos del SAG se encuentran en las denominadas “ventanas”, relacionadas con controles estructurales se desarrollan en la región basáltica de la cuenca. Las litologías de la Formación Itacumbú integran al SAG (Lebac, 2008; Techera *et al.*, 2017) siendo su desarrollo exclusivamente en subsuelo y restringido a la porción Oeste de la región infrabasáltica de la cuenca.

El límite Este del SAG lo define la base de la Formación Tacuarembó, la que se apoya en discordancia sobre las formaciones paleozoicas Buena Vista y Yaguarí. El límite Sur está dado por los afloramientos de los alrededores de la localidad de Curtina. Al Suroeste

y Oeste, el SAG está cubierto por los basaltos por lo que su desarrollo está controlado por los pozos, la información geofísica de subsuelo y los controles que ejercen algunos elementos estructurales de la cuenca.

Hacia el Sur, se asume que el SAG no se extiende más allá del Alto de Queguay tal como fue propuesto por Heinzen *et al.* (2003), Lebac (2008) y Techera *et al.* (2017). Los pozos Achar E-1, Cardozo Chico E-1, Salsipuedes, Guichón, Rincón del Bonete y Paso Ullestie (Figura 2, Tabla 1) muestran que las unidades componentes del SAG no están presentes en ese sector del subsuelo de la cuenca, verificándose además que en esos pozos los basaltos cretácicos se apoyan directamente sobre unidades paleozoicas. La presencia del SAG se verifica en los pozos Quebracho, Cerro Padilla E-1 y Los Cuadrados E-1 (Figura 2).

Hacia el Norte y Noroeste, el SAG también está cubierto por los basaltos y se extiende más allá de los límites geográficos de Uruguay por los territorios de Brasil y Argentina.

Tabla 1. Principales pozos de la Cuenca Norte que muestran la distribución y espesores de las unidades que componen el SAG, así como otros adyacentes que controlan su desaparición en el subsuelo.

Quando no fue posible o no se tiene información confiable se ha preferido incluir el espesor total del par Tacuarembó – Rivera en una sola columna

(Fuente: de Santa Ana y Veroslavsky, 2003; Lebac, 2008; Soto, 2014; Frikely S.A., 2015).

unidad pozo	UTM x	UTM y	Formación Itacumbú	Formación Tacuarembó	Formación Rivera	Formación Arapey
Gaspar (NOG - x-1)	436398	6611369	248	287	35	513
Belén (NO9B x-1)	433265	6588952	135	355	52	460
Itacumbú (NO10I x-1)	454197	6621212	215	325	34	421
Yacaré(NO8Y x-1)	502511	6655661	170	304	0	421
Pelado (NO7P x-1)	525849	6619549	86	414	36	234
Artigas (NO2A x-1)	552179	6633320	50	190		0
Salto (NO3S x-1)	413690	6519193	90	195		955
Arapey (IGP)	450522	6575901	-	269		543
Quintana E-2	555826	6531310	-	250	0	79
Cañada del Charrúa E-1	563347	6514893	-	212		38
Pepe Núñez E-1	557993	6519777	-	250		0
Cerro Padilla E-1	522758	6463772	-	170	0	434
Quebracho (NO4Q x-1)	416093	6476790	-	160	55	575
Cardozo Chico E-1	562909	6408768	-	-	-	213
Achar E-1	592650	6413051	-	-	-	100
Salsipuedes (NO6S x-1)	551158	6406921	0	-	-	210
Guichón (NO5G x-1)	474751	6419876	0	-	-	545
Los Cuadrados E-1	597471	6441130	-	190	-	-
Paso Ullestie (IGP)	422854	6394486	0	-	-	360
Centenario (exploratorio)	547439	6368828	-	0	0	149
Rincón del Bonete (IGP)	553046	6368157	0	-	-	160

La recarga del SAG ocurre por infiltración directa del agua de lluvia y del escurrimiento superficial a lo largo de la faja de afloramiento de las formaciones Rivera y Tacuarembó (Figura 2). Se da también por infiltración vertical en la estrecha faja occidental contigua a los afloramientos del SAG, donde los basaltos de la Formación Arapey exhiben espesores poco potentes. Cabe señalar que para las áreas aflorantes, el modelo de flujo subterráneo desarrollado por el PSAG mostró una importante interacción entre el acuífero y los ríos. Manzano y Guimaraens (2012) señalan que buena parte del agua que se recarga en las áreas de afloramiento se mueve en celdas de flujo locales, descargando a valles fluviales encajados, manantiales y pozos cercanos a la recarga, lo que coincide con una recarga efectiva reducida del orden 10-15 mm/año (Vives *et al.*, 2008).

Otras áreas de recarga local del SAG están asociadas a las ventanas que ocurren en la Cuenca Norte siendo las más destacadas: ciudad de Artigas y área adyacente, Rincón de Pacheco, Paguero y Pepe Núñez. En forma indirecta, la recarga local también ocurre por infiltración vertical a lo largo de zonas de fallas (abiertas) que afectan a los basaltos, y áreas donde la piezometría favorece los flujos descendentes (Manzano y Guimaraens, 2012).

Se adopta aquí que la recarga efectiva del SAG es mínima a nula cuando los espesores de los basaltos superan los 100 m con base en las propuestas de zonificación del SAG de Hirata *et al.* (2009), Foster *et al.* (2009) y Sindico *et al.* (2018). Sin embargo, vale la pena mencionar que con posterioridad al PSAG, otros estudios mostraron que la recarga es nula o mínima con espesores aún menores, indicando además que en torno a los 60 m de profundidad la circulación del agua pasa a ser preferencial en las zonas de fracturas horizontales del acuífero fisurado (Fernandes *et al.*, 2011; Wahnfried *et al.*, 2010). La presencia de niveles vacuolares en el perfil de un derrame basáltico dificulta aún más la infiltración vertical profunda (Fernandes *et al.*, 2012) por lo que, si se tiene en cuenta que las potencias promedio de las coladas en la cuenca se estiman entre 25 a 35 m, la presencia de dos o más derrames superpuestos inhibiría casi totalmente la recarga vertical efectiva del SAG.

La dirección y sentido del flujo del SAG está definida por la piezometría de pozos cuya distribución en la cuenca es muy heterogénea. Existe una gran densidad en las áreas aflorantes y un pequeño grupo de pozos profundos concentrados a lo largo del Corredor Termal del Río Uruguay. A su vez, cabe señalar que para la zona aflorante se ha definido más de un nivel hidráulico dentro del SAG (Gómez, 2007) lo que, sumado a la acción de bombeo, puede dificultar la interpretación de las direcciones de flujo regionales. Por otro lado, los niveles piezométricos de los pozos profundos del corredor termal pueden verse influenciados por la captación de agua de

las unidades del Pre-SAG. Cabe señalar que, en la Cuenca Norte, las unidades pérmicas del Pre-SAG que están en contacto con el SAG son las formaciones Buena Vista (areniscas finas a medias, blanquecinas a rojizas) y Yaguarí (pelitas y areniscas finas, de tonalidades variadas).

Existe una amplia región central de la Cuenca Norte donde la naturaleza del SAG se conoce apenas a través de algunos pozos estratigráficos y escasa información geofísica, y la ausencia de pozos para la captación de agua hace que el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del SAG sea muy poco conocido y sujeto a interpretaciones especulativas.

Uno de los aspectos a remarcar aquí es la comprobación de la estrecha relación que existe entre algunos de los principales rasgos estructurales de la Cuenca Norte con el funcionamiento hidrogeológico del SAG. En particular, se hará referencia al Lineamiento Arapey - Sopas, el que constituye un elemento de primer orden para el entendimiento de la hidrodinámica e hidroquímica del SAG (Oleaga, 2002; Manzano y Guimaraens, 2008).

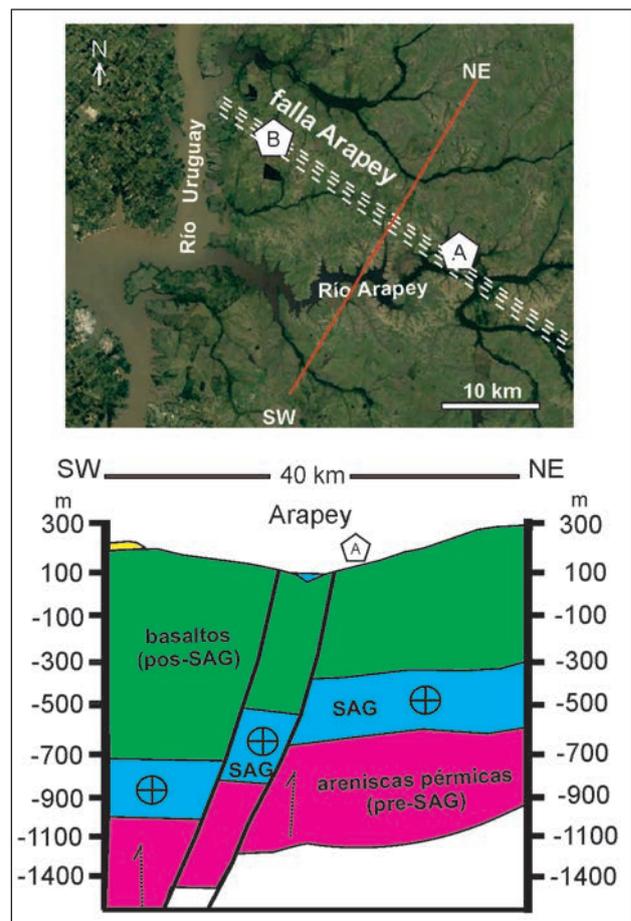


Figura 8. Esquema que muestra la compartimentación del SAG por la Falla Arapey. El rechazo es estima en 300 - 400 m, mostrando que hacia el Sur los basaltos rápidamente superan los 1000 m mientras que hacia el Norte alcanzan los 500m (modificado de Ucha y de Santa Ana, 1990; Marmisolle *et al.*, 2016).

El Lineamiento Arapey – Sopas, en particular en su sector occidental, es considerado una barrera más o menos efectiva para el tránsito de las aguas subterráneas del SAG de Norte hacia el Sur. Esta estructura pone en contacto por falla a las areniscas del SAG situadas al Sur con las areniscas de Buena Vista al Norte (Figura 8) estableciendo una conexión hidráulica lateral entre ambas unidades. La compartimentación del SAG, al menos a lo largo de la Falla Arapey, es consistente con el patrón de las líneas de flujo propuesto para la ciudad de Salto y alrededores por Gamazo *et al.* (2016) (Figura 9) siguiendo entonces la pendiente regional de la cuenca hacia el W-NW.

En la figura 10, se presenta el modelo conceptual de flujo del SAG modificando parcialmente de Heinzen *et al.* (2003), Oleaga (2002) y Techera *et al.* (2017)). En este trabajo se mantienen las direcciones de flujo al Norte del Lineamiento Arapey - Sopas, así como las dos tendencias que se registran en el área aflorante del SAG: a) en la zona de Rivera hacia el Noroeste, y al Sur de esta hacia el Suroeste y b) Al sur del Lineamiento Arapey la dirección de flujo es hacia el Noroeste como fuera señalado anteriormente. Por último, en relación a la ausencia de pozos

de agua en la región central, se ha preferido aquí eliminar un conjunto de curvas piezométricas dada la incertidumbre que las mismas generan sobre el comportamiento del SAG.

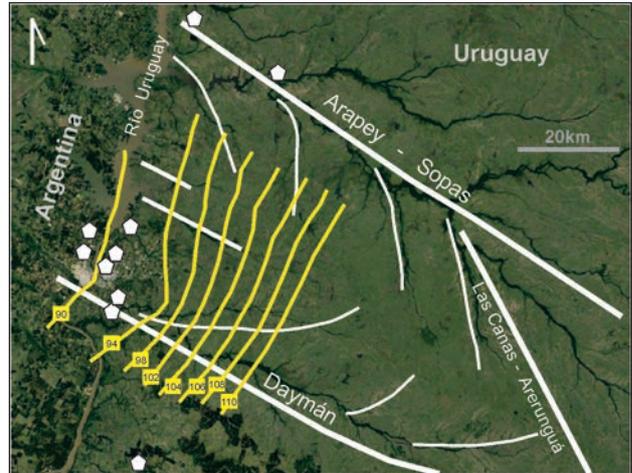


Figura 9. Piezometría en la región de la ciudad de Salto y alrededores realizada por Gamazo *et al.* (2016) tomando en cuenta el funcionamiento de un pozo Daymán (Salto - NO3S x-1).

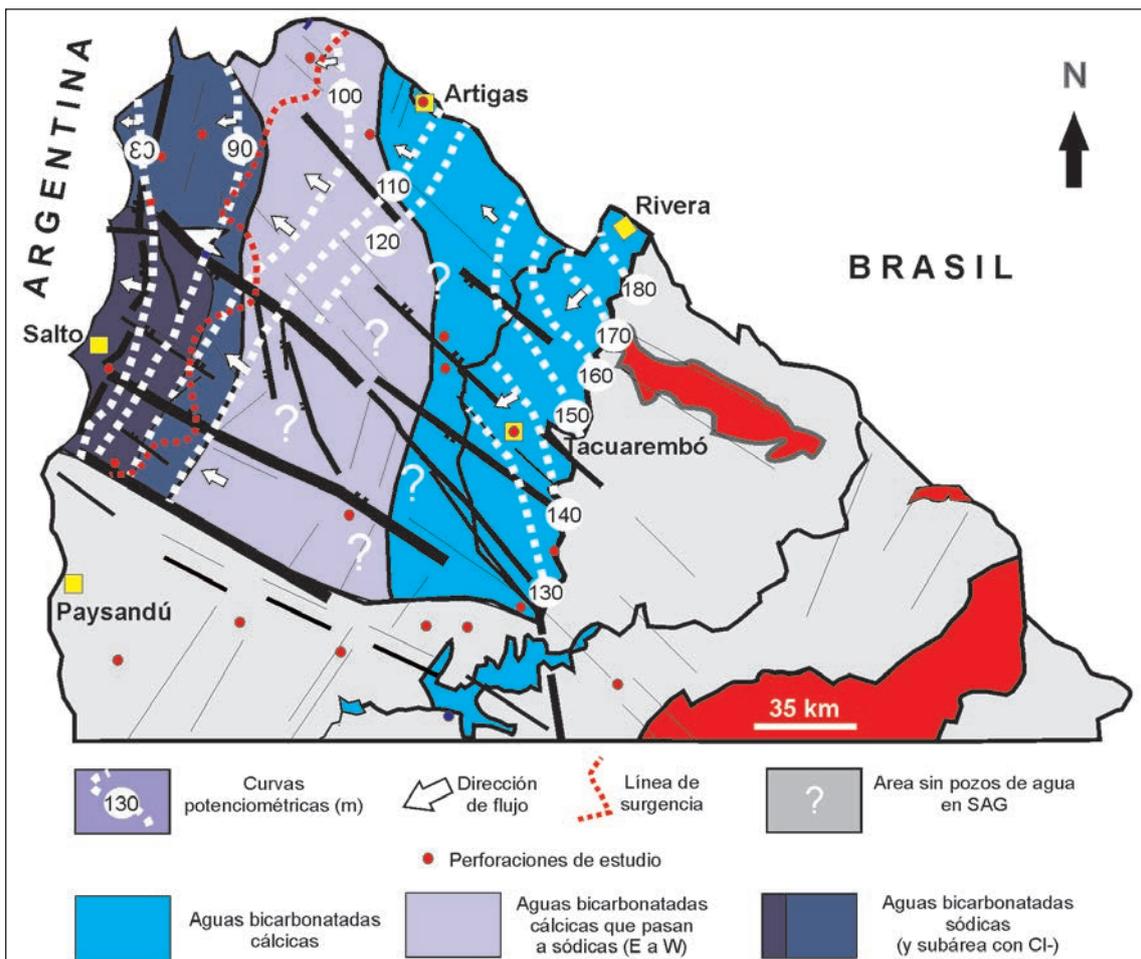


Figura 10. Modelo hidrogeológico conceptual del SAG en Uruguay para explicar el movimiento de las aguas subterráneas y el comportamiento hidroquímico (modificado de Montañó *et al.*, 1998; Lebac, 2008; Techera *et al.*, 2017; Gamazo *et al.*, 2016; Manzano y Guimaraens, 2008; Gastmans *et al.*, 2012). La línea de surgencia fue elaborada a partir de Lebac (2008) y Morales (2015).

No se hace aquí particular referencia a la descarga del sistema acuífero, la que es tratada en varios documentos del PSAG, reconociéndose una descarga regional del SAG hacia el W-NW.

A lo largo de ambos márgenes del río Uruguay se reconoce, asociada a la zona confinada, un área de surgencia que ocupa una extensa faja (figura 10). En esta, los pozos perforados que alcanzan el SAG presentan surgencia natural con presiones de carga que llegan a los 4.0 kg/cm² y caudales de surgencia que llegan a 230 m³/h (Techera *et al.*, 2017). Ambos parámetros pueden presentar valores altamente variables entre pozos. Por otra parte, y producto de la profundidad a la que se desarrolla el SAG, la temperatura del agua, en las diferentes perforaciones, varía en un rango de 39°C a 48°C (PEA, 2009).

La evolución geoquímica de las aguas del SAG está primaria y directamente vinculada con el patrón de flujo, incidiendo además la configuración estructural, los tiempos de tránsito y la interacción que ejercen las rocas infra y suprayacentes al SAG (Lebac, 2008). Los estudios hidroquímicos realizados durante el PSAG mostraron que el modelo conceptual regional, desarrollado durante el proyecto, es válido para casi todo el acuífero, con algunas excepciones (Manzano y Guimaraens, 2012).

En Uruguay, se conoce que las aguas del SAG en el área aflorante y zonas de ventanas son del tipo bicarbonatadas cálcicas y, subordinadamente, bicarbonatadas cálcico-magnésicas, con poca mineralización, lo que se refleja en las bajas conductividades eléctricas observadas (Lebac, 2008). Asimismo, los pozos ubicados sobre ambas márgenes del río Uruguay, o muy próximo a ésta y donde el SAG presenta un alto confinamiento, muestran aguas del tipo bicarbonatadas sódicas, con mayor grado de mineralización y conductividades eléctricas más elevadas.

Los pozos que se encuentran al Sur del Lineamiento Arapey muestran que las aguas bicarbonatadas sódicas presentan además el anión cloruro en su composición, así como exhiben otras anomalías con relación al contenido de algunos metales como As, Zn y Cd (Gastmans *et al.*, 2010). Manzano y Guimaraens (2008) atribuyen estas anomalías a una mezcla de las aguas de SAG con las ascendentes provenientes de los acuíferos paleozoicos infrayacentes, interpretación que también fue sugerida por Montañó *et al.* (1998), Decoud y Rocha (2000) y Carrión y Massa (2011).

Por último, en relación al comportamiento hidroquímico del SAG en la región central de la cuenca, se asume que sigue el patrón establecido en el modelo hidroquímico conceptual (PSAG, 2009), es decir que, de Este a Oeste, las aguas pasan progresivamente de aguas bicarbonatadas cálcicas a esencialmente sódicas (Figura 11).

Procesos relacionados con el intercambio iónico del sodio por el calcio, y posiblemente magnesio, son responsables por las modificaciones sufridas por las aguas bicarbonatadas cálcicas a sódicas a lo largo de su tránsito por el acuífero (Manzano y Guimaraens, 2008).

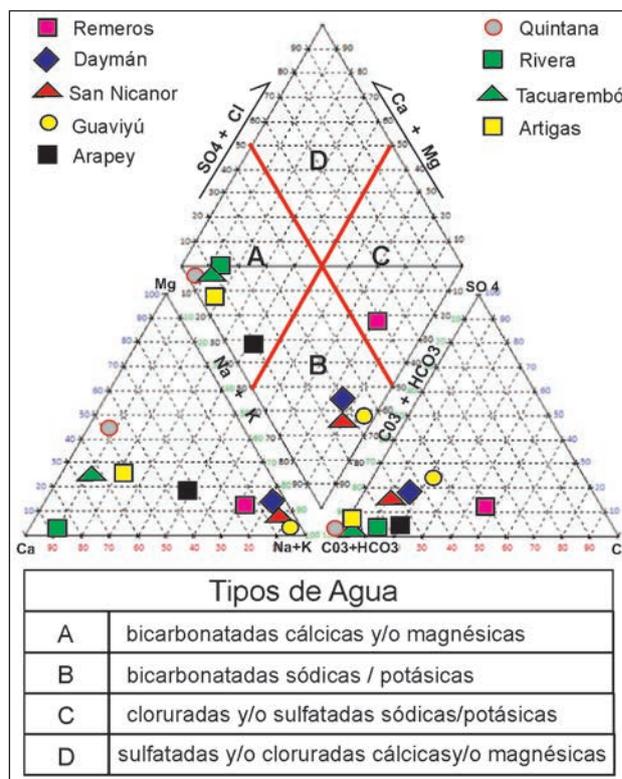


Figura 11. Diagrama de Piper mostrando la caracterización de las aguas del SAG para pozos seleccionados de las regiones: afloramientos, confinada próxima a la faja de afloramientos y alto confinamiento. Los análisis químicos de los pozos Remeros, San Nicanor, Daymán (Salto NO₃ x-1), Guaviyú (NO₄Q x-1), Nuevo Arapey (IMS, 2012) y Quintana (MEVIR) son inéditos. PSAG (2009) es la fuente para los pozos del área de afloramientos ubicados en las ciudades de Artigas, Rivera y Tacuarembó.

Los estudios isotópicos en el SAG revelaron que la edad de las aguas en zonas confinadas por basaltos, pero no lejos de las áreas de recarga, tiene varios miles de años de permanencia en el terreno y además que hacia el centro de la cuenca el agua está desprovista de ¹⁴C (Manzano y Guimaraens, 2012). En las regiones alejadas de las áreas de afloramiento y donde el SAG presenta un alto confinamiento, Mira *et al.* (2016) señalan para las aguas (provenientes de perforaciones en la provincia de Corrientes) edades (método ⁴He) superiores a 123 Ka. Todos estos datos sobre las edades del SAG permiten inferir que los tiempos de circulación y residencia de las aguas son elevados incluso cerca de las áreas de afloramiento, y para la región del SAG de mayor confinamiento

es posible que se esté en una situación no flujo (Gastmans *et al.*, 2012; Sindico *et al.*, 2018).

3.3. Usos del SAG

Las aguas subterráneas provenientes del SAG se utilizan para abastecimiento público y consumo humano de poblaciones rurales dispersas, actividades agropecuarias de abrevado de ganado y riego (principalmente hortifrutícola), abastecimiento de complejos termales, y, en menor escala, para uso industrial.

En el área de afloramientos del SAG, principalmente las ciudades de Rivera y Artigas y en menor medida Tacuarembó, se utilizan para abastecimiento público.

Otros poblados menores que se sitúan sobre la faja de afloramientos se abastecen exclusivamente de aguas subterráneas del SAG, por lo que este es el principal uso en la región de afloramientos (Figura 12). En esta región, es donde ocurre la mayor cantidad de perforaciones en predios privados con fines de consumo humano, riego e industrial. Si bien el número de perforaciones en el SAG para abastecimiento público no se diferencia mayormente de otros acuíferos de Uruguay (e incluso es inferior a otros acuíferos de menor extensión), el volumen extraído para este uso representa un tercio del agua subterránea total utilizada por la empresa pública Obras Sanitarias del Estado - OSE.

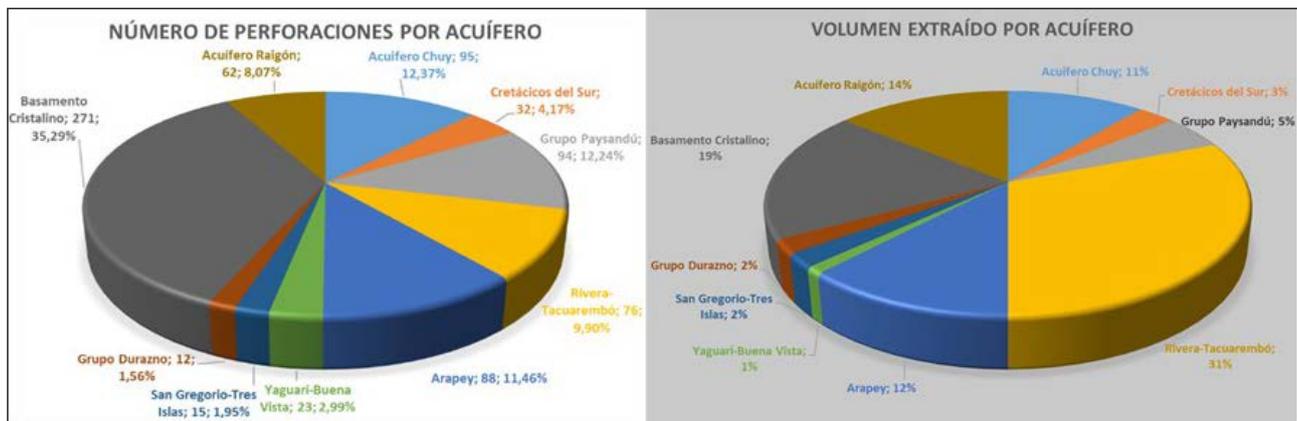


Figura 12. Diagramas que muestran la incidencia del Acuífero Guaraní en la explotación de agua subterránea para abastecimiento público en relación a otros acuíferos (Fuente: Conferencia de Andrés Pérez -OSE- en las *Jornadas Académicas del Instituto de Ciencias Geológicas*, Facultad de Ciencias, Montevideo, 2015)

En el Corredor Termal del Río Uruguay (alto confinamiento) el principal uso del SAG es el de recreación por los centros turísticos termales. Aunque estos centros representan una actividad de importantes ingresos, el elevado costo de perforación sumado a la inexistencia en el país de máquinas perforadoras adecuadas para esas profundidades y diámetros, ha provocado que el número de pozos destinados a ese fin sea limitado. Cabe aclarar que en Uruguay la capacidad operativa de las empresas perforadoras para alumbramiento de aguas subterráneas para cualquier uso está limitada a aproximadamente 250 m de profundidad. Existen algunos equipos de perforación para minería que permiten alcanzar profundidades de unos 1.000 m pero en diámetros que no son adecuados para la explotación.

En donde los basaltos de la Cuenca Norte alcanzan aproximadamente espesores superiores a los 50 m, el agua subterránea para riego, industria y consumo humano no es extraída del SAG. Bajo esta situación, se explotan directamente los pozos someros que captan agua del acuífero basáltico fisurado (Formación Arapey) y, en torno a la ciudad de Salto, de las areniscas que conforman el acuífero Salto (Formación Salto).

La gestión del SAG en Uruguay está regida por una serie de normas de las cuales, las principales y directamente aplicables se muestran en la Tabla 2. Algunas otras normas que hacen referencia lateralmente a la gestión de las aguas, en general, no fueron consideradas.

Tabla 2. Principales normas aplicables a la gestión del SAG en Uruguay.

Decreto Ley 14859/1978 Código de aguas	Establece el régimen jurídico de las aguas en la República Oriental del Uruguay
Decreto 214/2000: Plan de Gestión del Acuífero Infrabasáltico Guaraní en territorio de la República Oriental del Uruguay.	Se aplica a la captación de aguas termales. En él, además de abordar diferentes aspectos administrativos para el aprovechamiento de perforaciones infrabasálticas y la perforación de nuevas, establece una serie de condiciones específicas tales como: Depresión máxima del nivel dinámico, caudal instantáneo máximo, distancia entre perforaciones, etc.
Decreto 86/2004: norma técnica de construcción de pozos perforados para captación de agua subterránea.	Este decreto es de común aplicación en la zona aflorante y confinada (somera y media) ya que, para la perforación del Sistema Acuífero Guaraní, en la zona profunda, el artículo 57 remite al Decreto 214/2000 y sus modificativos.
Decreto 349/2005. Reglamento de EIA.	Establece la obligatoriedad de presentar EIA para tomas de agua subterránea capaces de extraer 50 l/s. Esto, en principio, excluye el caso del SAG ya que para el caso de los pozos termales (único caso donde las perforaciones superan dicho límite), el decreto 214/2000 fija como caudal máximo 42 l/s.
Ley 18.308/2008 Ordenamiento territorial y desarrollo sostenible.	Establece el marco regulador general para el ordenamiento territorial y desarrollo sostenible, sin perjuicio de las demás normas aplicables y de las regulaciones, que, por remisión de ésta, establezcan el Poder Ejecutivo y los Gobiernos Departamentales.
Norma UNIT 833:2008 "Agua potable. Requisitos".	Esta Norma establece un conjunto de requisitos que debe cumplir el agua potable para consumo humano, cualquiera sea su fuente de captación, tipo de tratamiento, producción y sistema de distribución. A través del Decreto 375/11 el Poder Ejecutivo modifica el Reglamento Bromatológico Nacional adoptando esta norma y a su vez OSE toma como base este Reglamento para establecer su Norma Interna de calidad de agua.
Ley 18.610/2009 Política Nacional de Aguas	Establece los principios rectores de la Política Nacional de Aguas dando cumplimiento al inciso segundo del artículo 47 de la Constitución de la República
Decreto 183/2013. Comisión Acuífero Guaraní.	Créase la Comisión del Sistema Acuífero Guaraní como órgano asesor del Consejo Regional de Recursos Hídricos constituido por el Decreto del Poder Ejecutivo N° 262/2011 de fecha 25 de julio de 2011
Decreto 205/2017 Plan Nacional de Aguas	La ley 18610 establece como Instrumento de la Política Nacional de Aguas la planificación a nivel nacional, regional y local ejercida mediante planes que contengan los lineamientos generales de la actuación pública y privada en materia de agua. A través del presente decreto se aprueba el Plan Nacional de Aguas.

4. ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO EN FUNCIÓN DEL SAG

Sobre la base de criterios geológicos, hidrogeológicos y socioeconómicos, se propone la zonificación del territorio ocupado por el Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay como insumo para discutir su gestión y protección ambiental (Figura 13).

Los principales aspectos técnicos contemplados en la propuesta son las características hidráulicas, forma de explotación, accesibilidad al recurso, calidad natural, vulnerabilidad a la contaminación antrópica y temperatura (Tabla 3).

a) La Zona A comprende las áreas de afloramiento de las unidades físicas que constituyen el SAG sumado a una faja de seguridad de 2 km de ancho a lo largo de su perímetro (*buffer*). El criterio de 2 km de ancho es el que se adopta en *Subsídios para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guaraní no Estado de São Paulo, Brasil* (Albuquerque *et al.*, 2012) y por la Agencia Nacional de Aguas del Brasil para los otros estados donde ocurre el SAG. Actualmente, la definición de esta zona en Uruguay se encuentra limitada por la disponibilidad de la cartografía geológica nacional a escala 1:500.000 (Preciozzi *et al.*, 1985), haciéndose notar que para el desarrollo de

herramientas de gestión es necesaria una escala de mayor detalle. La zona A constituye el área donde los recursos hídricos del SAG extraídos son renovables hasta un nivel equivalente a la recarga natural y, a su vez, es el área de mayor vulnerabilidad y sensibilidad ambiental. Por calidad, disponibilidad, accesibilidad y costos constituye la fuente más importante de agua subterránea para el abastecimiento de la población, pero la posibilidad de contaminación por actividades antrópicas en la superficie del terreno, marca la necesidad de adopción de directrices y controles que aseguren su no afectación por las cargas contaminantes aplicadas. De hecho, se han detectado en algunos casos, sobre todo en la ciudad de Rivera y alrededores, la presencia de contaminantes en el agua subterránea (particularmente nitratos) producto de las actividades agrícola-ganaderas y carencias en el saneamiento (Nolla, 2010; Pérez y Rocha, 2002), ya sea por la ausencia del mismo y/o la no conexión por parte de los usuarios.

b) La Zona B comprende el área donde el acuífero está cubierto por los basaltos desarrollándose a profundidades variables que oscilan desde los pocos a las centenas de metros. Está definida por los límites establecidos para la Zona A (afloramientos + *buffer*) y los que se adoptan para la Zona C (surgencia).

Esta zona es subdividida en 2 Subzonas (b1 y b2), siendo el límite entre ambas la isópaca de basaltos de 100 m. Este criterio está directamente vinculado a la posibilidad de infiltración efectiva del SAG del agua proveniente de los basaltos asumiéndose que, a partir de esos valores de espesores de basaltos, el acuífero se encuentra naturalmente protegido de las actividades antrópicas (excepto perforaciones). La zona B está caracterizada por una producción agropecuaria, donde el uso del agua subterránea se vincula a la explotación de los basaltos del acuífero Arapey. La naturaleza del SAG en esta zona es muy poco conocida por lo que su potencial explotación dependerá significativamente del avance en el conocimiento sobre la naturaleza del mismo.

c) La Zona C comprende la región en la que el acuífero está protegido por los mayores espesores de basalto y donde sus niveles piezométricos se ubican por encima de la superficie del terreno (surgencia). La cobertura basáltica asegura que el acuífero esté protegido y no resulte sensible a los impactos que pueden ocurrir debido a los diferentes usos del suelo (con excepción de aquellas

actividades que impliquen perforaciones profundas). Es en esta zona donde el SAG presenta las mejores condiciones para uso termal por caudal, temperatura y surgencia, características que permiten su actual explotación transfronteriza a lo largo del Corredor Termal del Río Uruguay. Sin embargo, esta zona es altamente sensible a efectos negativos ocasionados por la ausencia de una adecuada planificación y gestión del uso del recurso. Entre estos se destacan: el efecto de la interferencia hidráulica entre pozos vecinos (a la fecha hay nueve pozos geotérmicos en un área relativamente restringida) que podría reducir la surgencia y, en menor medida, disminuir la temperatura del agua subterránea; y el riesgo de intrusión de aguas del Pre-SAG por efecto de la extracción. Buenas prácticas tales como: el reciclado, la utilización en riego de jardines; la calefacción de áreas en instalaciones hoteleras, la reutilización y eliminación segura de los efluentes (particularmente si hay alta salinidad); y la combinación del recurso térmico con agua fría de acuíferos superficiales para usos que no requieren temperatura elevada, conducirán a un uso más racional y sostenible del agua termal.

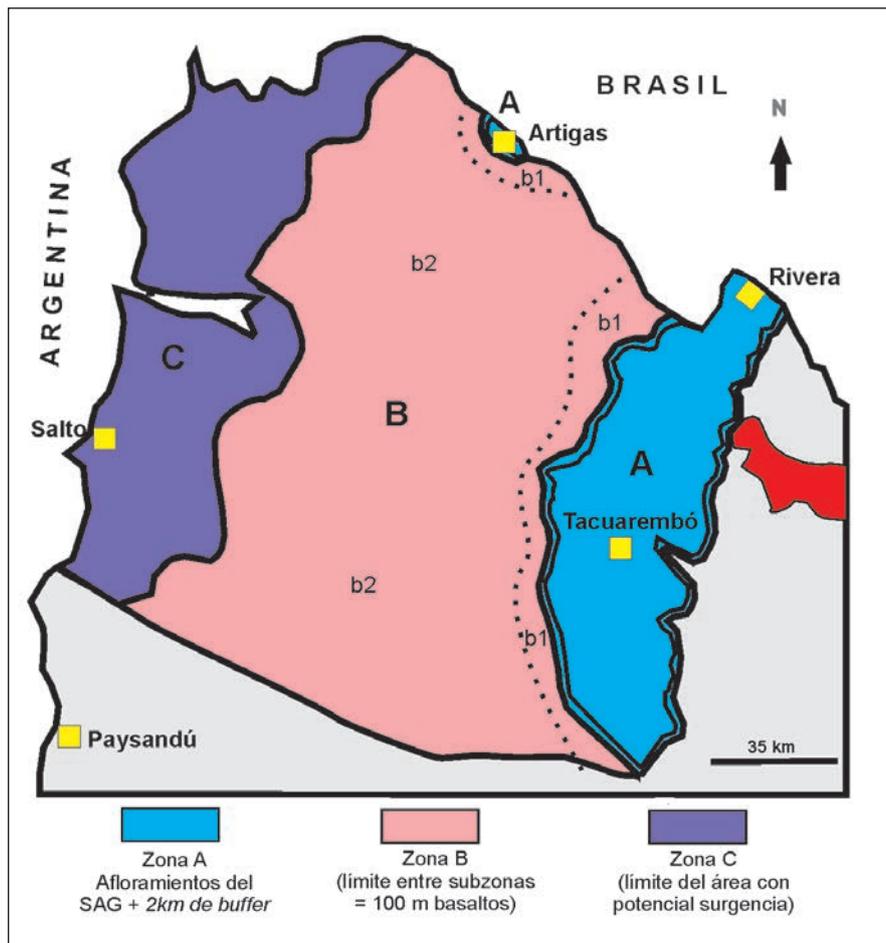


Figura 13. Propuesta de zonificación del SAG en Uruguay. El área *buffer* de la Zona A está exagerada para lograr la representación de la línea de afloramientos del SAG. La información de subsuelo para trazar el límite entre las Subzonas b1 y b2 provienen de Techera *et al.* (2017), Soto (2014) y de datos obtenidos para este trabajo. La línea de surgencia está parcialmente modificada de las propuestas de Lebac (2008) y Morales (2015).

Tabla 3. Resumen sobre los principales aspectos sobre la propuesta de Zonificación del SAG en Uruguay.

	Área de afloramiento		Área confinada	
	Zona A	Zona B		Zona C
		Zona b1	Zona b2	
Situación geográfica	Área de afloramiento y buffer, incluyendo las áreas de ventanas del basalto	Áreas confinadas próximas al afloramiento y basalto con espesor menor a 100m	Áreas confinadas mayor a 100 m hasta el límite de surgencia	Área de alto confinamiento con potencial de surgencia
Características hidráulicas	Agua proveniente de recarga. El almacenamiento es de tipo libre a semiconfinado. La velocidad del flujo del agua es más rápida que en las otras zonas. Las aguas son relativamente modernas.	Acuífero confinado, con posible recarga vertical descendente a través del basalto. La explotación puede inducir flujos laterales de agua de la zona de recarga, cuando ésta se encuentra próxima (decenas de km), aumentando la disponibilidad. La velocidad de flujo comienza a enlentecerse.	Características hidráulicas poco conocidas. Recarga vertical nula. Velocidad de circulación muy baja. Aguas "viejas"	Recarga vertical nula con posibles flujos verticales ascendentes (potenciometría mayor que los basaltos) Agua disponible que procede de su almacenamiento (S). Velocidad de circulación extremadamente baja a nula. Aguas antiguas > a 40.000 años
Forma de explotación recomendada	El caudal total explotable (caudal sostenible) debería definirse para la cuenca hidrográfica en función de la recarga del SAG, de sus funciones hidráulicas y ecológicas del flujo de base a los ríos y en otros cuerpos de agua superficial	El comportamiento del acuífero es semejante al sistema confinado. Debido a la proximidad del área de recarga, la explotación intensa (aumento de los gradientes hidráulicos) puede inducir a una mayor disponibilidad de agua para esas porciones del acuífero, trayendo agua de las áreas de afloramiento	Región actualmente inexplorada. Para esta área se asumen características intermedias para la explotación entre b1 y C. Necesidad de realización de estudios de evaluación del potencial hídrico de esta región.	Como no hay reposición del agua extraída por los pozos (zona de recarga distante y flujos lentos a nulos), la explotación de esas porciones del acuífero hace que la carga hidráulica decrezca con el tiempo. Esta situación hace necesario el control y la limitación de la explotación, considerando: a) la interferencia entre pozos b) la disminución de niveles piezométricos conduce a un aumento del costo de explotación (bombeo) c) la sostenibilidad de volúmenes extraídos vinculado al almacenamiento
Accesibilidad al recurso (costo de perforación y límite de bombeo)	Sin problema de acceso Pozos tubulares de medio y bajo costo	Sin problemas de acceso Pozos tubulares de costo medio	La explotación por pozo es limitada por el costo de las captaciones. Algunas actividades económicas (agrícolas, agro-industriales e industriales) pueden viabilizar la explotación hasta profundidades del entorno de los 250 m.	La explotación por pozo es limitada por el costo de las captaciones. Pozos tubulares pueden alcanzar más de 1.000 metros de profundidad, exigiendo altas inversiones y tecnología. Cuando el nivel dinámico del pozo alcanza los 400 m, hay limitación técnica y, sobre todo, económica de la explotación
Calidad natural	Sin problemas detectados	Sin problemas detectados	No hay datos	Áreas con problemas de salinidad y elementos tales como arsénico, cadmio y otros, en áreas específicas
Vulnerabilidad a la contaminación antrópica	Región con áreas de potencial alta vulnerabilidad	Baja vulnerabilidad. Potenciales problemas de contaminación a través de los basaltos fracturados.	Vulnerabilidad nula frente a los contaminantes de superficie.	Vulnerabilidad nula frente a los contaminantes de superficie. En el caso de la Región del corredor termal, efectos hidráulicos vinculados a la extracción pueden llevar a una situación de riesgo de contaminación por entrada de agua de estratos infrayacentes
Temperatura	Baja	Baja	La temperatura aumenta con el confinamiento en función de la fórmula: $T = 0.0274 * \text{espesor acuitardo superior} + 20.2$ (Oleaga 2002)	Igual al anterior. Los pozos existentes registran temperaturas entre 30°C y 48°C

5. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

El estado actual sobre el conocimiento de las características hidrodinámicas e hidroquímicas del SAG en Uruguay es heterogéneo y aún con vastas áreas inexploradas. No obstante, es posible establecer un modelo hidrogeológico conceptual básico que sustente, sobre una base técnica rigurosa, la construcción de una estrategia con el propósito de establecer pautas para su gestión y protección ambiental.

La propuesta de zonificación del SAG aquí presentada puede ser utilizada como orientación para la gestión del recurso en Uruguay y útil también para abordar varios de los aspectos transfronterizos que se pongan a discusión y/o tratamiento con los países que Uruguay comparte este recurso. La reciente ratificación de los cuatro países del "Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní", con el objetivo promover la conservación y protección ambiental del SAG podría ser un nuevo impulso dinamizador. En ese sentido, en un mediano y largo plazo, podría propiciar una mejora en la gestión del Acuífero la que debería darse a través del intercambio de buenas prácticas y de nuevos esfuerzos para avanzar en el conocimiento del SAG, y no limitarse exclusivamente a la necesaria coordinación política y técnica de las cuestiones transfronterizas.

La Zona A es la de mayor vulnerabilidad a la contaminación del SAG siendo las principales actividades que amenazan la calidad natural de sus aguas: la urbanización y disposición de aguas residuales urbanas domésticas; los proyectos industriales que involucren el almacenamiento y manejos de productos químicos peligrosos asociados al tratamiento de efluentes y la disposición final de residuos sólidos; y la intensificación de la agricultura y la forestación. En esta zona se localizan las capitales departamentales de Rivera, Artigas y Tacuarembó las cuales deben tener en cuenta la importancia cada vez mayor del SAG para el abastecimiento de agua potable a sus poblaciones. Muy particularmente, en las dos primeras, donde además se suma su carácter transfronterizo, con situaciones de explotación intensa del otro lado de la frontera, las cuales deben ser evaluadas en función del potencial de uso del acuífero.

En las zonas B y C, el SAG se encuentra debajo de la cobertura basáltica. En la Subzona b1 existe posibilidad de recarga a través de los basaltos, y por lo tanto, se deberán adoptar medidas de protección del acuífero en función del tipo de actividad que se desarrolle en la superficie del terreno. En la Subzona b2 y la Zona C, los estudios realizados durante el PSAG sobre la velocidad de flujo del agua subterránea, aún para regiones cercanas a las áreas de recarga, permiten admitir una mínima vulnerabilidad a la contaminación, con excepciones para elementos persistentes y de gran movilidad

en el muy largo plazo (PEA, 2009). Las amenazas ambientales para el SAG en estas zonas, están relacionadas exclusivamente a las actividades que involucren perforaciones: explotación termal; explotación de aguas para usos industriales y riego; exploración - explotación de hidrocarburos; y explotación geotérmica. Estas actividades deben requerir de estudios de impacto ambiental para su realización además de ser controladas y monitoreadas por los organismos de gestión y protección de las aguas subterráneas.

La posibilidad de crecimiento de la demanda de aguas del SAG para uso extenso e intensivo, a corto plazo, se limita a las Zonas A y C. En ambas, el aumento de la demanda estará relacionada al tipo de actividad que hoy soportan y fueron señaladas precedentemente. La Zona C, por las condiciones de surgencia natural, temperatura y enormes caudales, reviste condiciones naturales para incrementar su explotación como recurso geotérmico de baja entalpía, con potencial para la expansión futura en el desarrollo de nuevos centros termales y varios usos industriales y procesos agroindustriales, aunque sus temperaturas son bajas para la generación de energía eléctrica convencional.

La normativa actual (Decreto 214/2000) se refiere a la gestión del Acuífero Guaraní, pero en función de la definición dada por el Proyecto SAG, algunas de las perforaciones que son utilizadas por los centros termales, explotan aguas del SAG y del PRE-SAG. En este sentido, a corto plazo, esta normativa debería ser objeto de revisión para atender la actual situación y enmarcar los futuros proyectos de pozos profundos para la captación de aguas termales en esta región dada, en particular, la implicancia ambiental (calidad de agua y efluentes).

Los esfuerzos que se deben realizar para avanzar en el conocimiento del SAG en la Zona B podrían propiciar o estimular su explotación en usos agrícolas, industriales y abastecimiento público. En especial, por aspectos económicos y operativos, en aquellas regiones donde las coberturas de basaltos no superen los 250 – 300m y, en particular, en regiones donde actualmente existen dificultades para la captación de aguas del acuífero Arapey por bajos caudales y/o calidad de agua.

A manera de síntesis se presentan las siguientes conclusiones:

- a) La zonificación del SAG en Uruguay en 3 zonas constituye un primer avance para el desarrollo de un intercambio científico-institucional que conduzca a la discusión y elaboración de pautas para la gestión de este Sistema Acuífero acordes a las diferentes situaciones hidrogeológicas que lo componen;
- b) El principal conflicto de gestión del agua subterránea en la Zona A se relaciona con su vulnerabilidad a la contaminación antrópica y el potencial incremento de elementos tales como

nitratos, cloruros y compuestos orgánicos derivados de la infiltración directa de aguas contaminadas. Adicionalmente, la elevada concentración de pozos en el área, sumado a que varios de estos no están catalogados en las bases de datos de los organismos gestores, provoca un desconocimiento del volumen real extraído del acuífero;

- c) La Zona B está prácticamente inexplorada y a su vez es poco conocida desde el punto de vista hidrogeológico, considerándose conveniente destinar esfuerzos y recursos para desarrollar el conocimiento con el fin de prever futuras situaciones de desarrollo de actividades sustentadas con base en la extracción de aguas subterráneas, inicialmente, en áreas seleccionadas con dificultades para la captación de aguas en el Acuífero Arapey;
- d) En la Zona C el elevado costo de captación de aguas subterráneas podría suponer un desarrollo relativamente lento de la perforación de nuevos pozos. Un mayor control de las extracciones de los pozos actuales y potenciales futuros ha de profundizar en el entendimiento del SAG y su comportamiento auxiliando a prevenir, por ejemplo, pérdidas potenciales de surgencia y temperatura. La consideración de la disposición de los efluentes salinos debe ser parte de una agenda sobre las buenas prácticas de uso del acuífero;
- e) Las características hidrodinámicas e hidroquímicas concebidas en el modelo hidrogeológico conceptual del SAG sustentan que las cuestiones transfronterizas sobre su gestión quedan limitadas, desde el punto de vista físico, a una estrecha faja de algunos kilómetros, la cual debería ser definida técnicamente en un futuro a través de estudios conjuntos entre los países involucrados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, C., Ferraresi, P., Ibáñez, S.P. y Rodríguez Schelotto, M.L. 2008. LCV Síntesis – Muestras de Subsuelos y Afloramientos (Perfiles Relevados por PyT Consultora SRL). Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sustentable del Sistema Acuífero Guaraní, 23 p.

Albuquerque Filho, J.L., De Carvalho, A.M., Ikematsu, P., Costa Barbosa, M., Iritani, M., Nogueira Pressinotti, M.N., Rocha, G., Pereira Militão da Silva, M. y Theodorovicz, A. 2012. Diretrizes para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guaraní no estado de São Paulo, Brasil. Boletín Geológico y Minero, 123 (3): 353-366.

Araújo, L.M., França, A.B. y Poter, P.E. 1995. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas hidrogeológicos das Formações

Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Mapas. UFPR-Petrobras, Curitiba, Texto Explicativo, 16 p.

Araújo, L.M., França, A.B. y Poter, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. Hydrogeology Journal, v. 7: 317-336.

Bochi do Amarante, F. 2017. Arquitetura de facies e evolução estratigráfica da Formação Tacuarembó, Bacia Norte-UY. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 40 p.

Bossi. J. y Heide, E. 1970. Carta geológica del Uruguay, escala 1: 100.000. Segmento Río Arapey, sector XVIII. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo, 35p.

Bossi, J., Ferrando, L., Elizalde, G., Morales, H., Ledesma, J., Carballo, E., Ford, I. y Montaña, J. 1975. Carta Geológica del Uruguay a escala 1:1.000.000. Dirección de Suelos y Fertilizantes (MGAP), Montevideo, 32 pp.

Bossi, J. y Schipilov, A. 2007. Rocas ígneas básicas de Uruguay. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, 364 p.

Carrión, R. y Massa, E. 2011. Caracterización hidroquímica de las regiones termales recreativas de Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología. Informe interno, Montevideo, 12 p.

Decoud, P. y Rocha, L. 2000. Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NW del Uruguay. 1st Joint World Congress on Groundwater, Actas en CD - ROM, Fortaleza (Fuente: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/issue/view/1191>)

de Santa Ana, H. y Veroslavsky, G. 2003. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico-Cretácico Temprano, En: Veroslavsky G, Ubilla M y Martínez S (eds.): Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales – Mesozoico. DIRAC – Facultad de Ciencias, Montevideo, p. 51-47.

de Santa Ana, H., Veroslavsky, G., Fulfaro, V. J. y Rossello, E. 2006. Evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero – Pérmico de la Cuenca Norte. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico. DIRAC - Facultad de Ciencias, Montevideo, p. 209-256.

DINAMIGE. 2009. Estimación de la extracción de agua subterránea: principales acuíferos de Uruguay. Informe de Hidrogeología – DINAMIGE. (Fuente: http://www.miem.gub.uy/sites/default/files/estimacion_de_extraccion_anual_de_aguas_

- subterráneas_en_los_principales_acuíferos_del_uruguay.pdf)
- Ferrando, L., Andreis, R.R. y Montaña, J. 1987. Estratigrafía del Triásico-Jurásico uruguayo en la Cuenca de Paraná. *Actas III Simposio Sul-Brasileiro de Geología*, Curitiba. SBG, 1: 373-378.
- Fernandes A.J., Negri, F.A., Azevedo, J.M. y Varnier, C. 2011. Investigação regional do potencial da recarga do Sistema Aquífero Guaraní através dos basaltos do Aquífero Serra Geral. En: *A gestão do Sistema Aquífero Guaraní: um exemplo de Cooperação / Organizadores: R. Hirata, G. Rocha, F. Sindico.* – São Paulo: IGc/USP, 88 p.
- Fernandes, A.J., Negri, F., Azevedo Sobrinho, J.M., Varnier, C. y Janasi, J. 2012. Análise de fraturas dos basaltos do Aquífero Serra Geral e o potencial de recarga regional do Sistema Aquífero Guaraní, *Boletín Geológico y Minero*, 123: 325 – 339.
- Frikely S.A. 2015. Solicitud de autorización ambiental previa. Informe ambiental resumen. Complejo Termal Marino del Hum. Disponible en: <http://www.mvotma.gub.uy/portal/ambiente-territorio-y-agua/gestiona/puesta-de-manifiestos/item/10007371-frikely-s-a.html>
- Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G. y Garduño, H. 2009. La Iniciativa del Acuífero Guaraní – Hacia la Gestión Realista del Agua Subterránea en un Contexto Transfronterizo. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea Lecciones de la Práctica*. WG Mate – The world bank (acceso: <file:///C:/Users/Usuario/Desktop/transboundary-groundwater-management-issues-for-guarani-aquifer-368-spanish.pdf>)
- Gamazo, P., Ramos, J., Olivera, M., Sapriza, G., Batista, L., Lacués, X., Panizza, A., Ribero, V. y Manganelli, A. 2016. Modelo matemático del Acuífero Guaraní para la gestión de explotaciones termales en la zona de Concordia (Entre Ríos, Argentina) y Salto (Uruguay). IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Catamarca, Argentina
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Chang, H.K., Caetano-Chang, M.R. y Nogueira Pressinotti, M.M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3): 249-265.
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Chang, H.K., Marmisole, J. y Oleaga, A. 2010. Influência do Arcabouço Hidroestratigráfico nas Ocorrências de Arsênio em Águas Subterráneas ao Longo do Corredor Termal do Rio Uruguai (Argentina-Brasil-Uruguai). *Geociências*, 29: 105-120.
- González, S. y de Santa Ana, H. 1998. Caracterización de la secuencia Eomesozoica continental en la región noroccidental de la Cuenca Norte (Uruguay). *Actas 2º Congreso Uruguayo de Geología*, Punta del Este, 43-48p.
- Gómez, A.A. 2007. Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las formaciones Tacuarembó - Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay. Tesis de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 149p.
- Hirata, R., Gastmans, D., Santa Cruz, D.N., Soares, P.C, Faccini, U., Araguas, L. y Vives, L. 2009 Modelo conceitual, funcionamiento e potencialidades do Sistema Aquífero Guaraní. En: *Congresso Aquífero Guaraní Memória / II Congresso Aquífero Guaraní*, 4 a 7 de Novembro de 2008, Ribeirão Preto, SP.
- Heinzen, W., R. Carrión, E. Massa, S. Pena y M. Staff. 2003. Mapa hidrogeológico - República Oriental del Uruguay. Dinamige, Montevideo, Mapa.
- Lebac. 2008. Informe Final de Hidrogeologia do Projeto Aquífero Guaraní. Coord.: Gastmans, D. y Chang, H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guaraní. Rio Claro, 172 p.
- Machado, J.L.F. 2005. Compartimentação Espacial e Arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guaraní no Rio Grande do Sul. Tese, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo (RS), 238 p.
- Manzano, M. y Guimaraens, M. 2008. Hidroquímica regional del SAG. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní. Informe realizado para el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní a través del consorcio de empresas Tahal Consulting Engineers, SEINCO S.R.L. Hidroestructuras S.A., Hidrocontrol S.A. e Hidroambiente S.A. 223 p.
- Manzano, M. y Guimaraens, M. 2012. Hidroquímica del Sistema Acuífero Guaraní e implicaciones para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3): 281-295.
- Marmisolle, J. 2015. Análisis tectonosedimentario de depocentros en el sector noroeste de la Cuenca Norte: estudio de relictos precarboníferos. Tesis de Maestría, PEDECIBA – Facultad de Ciencias, Montevideo, 139p.
- Marmisolle, J., Veroslavsky, G. y de Santa Ana, H. 2016. Depocenters with potential preservation of pre-Carboniferous rocks in Norte Basin – Uruguay. In: *SEG - International Conference and Exhibition*, Barcelona, Spain.
- Mesa, V. y Perea, D. 2015. First Record of Theropod and Ornithopod Tracks and Detailed Description of Sauropod Trackways from the Tacuarembó Formation (Late Jurassic-? Early Cretaceous) of Uruguay. *Ichnos*, 22(2):109-121.

- Mira, A., Veroslavsky, G., Vives, L. y Rodríguez, L. 2016. Influencia de los lineamientos estructurales sobre el flujo del Sistema Acuífero Guaraní en la provincia de Corrientes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73 (4): 478 – 492.
- Montaño, J. 2003. Recursos hídricos subterráneos. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico*. DIRAC - Facultad de Ciencias, Montevideo, p. 191-212.
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Elía, M., Pérez, A., Nagy, M., Collazo, P. y Decoud, P. 1998. Acuíferos regionales en América Latina. SAG. Capítulo argentino – uruguayo. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 217 p.
- Morales, E. 2015. Potencial geotérmico del departamento de Artigas. Informe de Asesoramiento Técnico para la Intendencia Municipal de Artigas, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Montevideo, 23p.
- Nolla, G. 2010. Usos agrícolas intensivos de suelos y su relación a la calidad de las aguas que infiltran al Sistema Acuífero Guaraní en la zona periurbana de la ciudad de Rivera, Uruguay. Tesis de Maestría. Universidad de León. 143 p.
- Oleaga, A.B. 2002. Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector de Uruguay: un enfoque integral. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM, Ciudad de México, 119 p.
- PEA. 2009. Acuífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações / Acuífero Guaraní: Programa Estratégico de Acción - Edición español/portugués. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p.
- Perea, D., Soto, M., Veroslavsky, G., Martínez, M. y Ubilla, M. 2009. A Late Jurassic fossil assemblage in Gondwana: Biostratigraphy and correlations of the Tacuarembó Formation, Parana Basin, Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences*, 28: 168-179.
- Pérez, A. y Rocha, L. 2002. Aportes al conocimiento del Acuífero Guaraní. Área ciudad de Rivera - Uruguay. *Groundwater and Human Development*. Bocanegra, E., Martínez, O., Massone, H. (Eds) 2002. ISBN 987-544-063-9. Mar del Plata. Argentina.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. y Rossi, P. 1985. Memoria Explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500.000. DINAMIGE, Montevideo, 90 p.
- P y T Consultora SRL. 2007. informe Final de Relevamientos Geológicos, Relatorio Técnico, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, Buenos Aires, 93 p.
- Rocha, G.A. 1996. Mega reservatório de água subterrânea do Cone Sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão. Contribuição ao Seminário Internacional "Acuífero Gigante do Mercosul". Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 26 p.
- Rodríguez, P., G. Veroslavsky, M. Soto, J. Marmisolle, P. Gristo y H. de Santa Ana. 2015. New integrated Bouguer gravity anomaly map inshore Uruguay: preliminary implications for the recognition of crutal domains. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1515-1519 p.
- Sindico, F., Hirata, R. y Manganelli, A. 2018. The Guaraní Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>
- Soto, M. 2014. Geología de la región de Pepe Núñez, Cuenca Norte – Uruguay. Tesis de Maestría, PEDECIBA – Facultad de Ciencias, Montevideo, 381 p.
- Soto, M., De Carvalho, M.S.S., Maisey, J.G, Perea, D. y Da Silva, J. 2012. Coelacanth remains from the Late Jurassic-?earliest Cretaceous of Uruguay: the southernmost occurrence of the Mawsoniidae. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 32(3): 530-537.
- Soto, M. y Perea, D. 2008. A ceratosaurid (Dinosauria, Theropoda) from the Late Jurassic-Early Cretaceous of Uruguay. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 28 (2): 439-444.
- Techera, J., Massa, E., Izquierdo, D. y Pérez, S. 2017. Mapa del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo, (disponible: <http://www.dinamige.gub.uy>).
- Ucha, N. y de Santa Ana, H. 1990. Evaluación del potencial hidrocarburífero del sector noroccidental de la Cuenca Norte uruguaya. División Investigación y Desarrollo, ANCAP, Montevideo, 140 p.
- Vives L., Rodríguez, L., Gómez, A. y Cota, S.D.S. 2008. Modelación Numérica Regional del Sistema Acuífero Guaraní. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Global Environment Facility (GEF). Informe Técnico. 144 p.
- Wahnfried I., Fernandes, J.A. y Hirata, R. 2010. Modelo conceitual de fluxo para o Aquitarde Serra Geral e Sistema Acuífero Guaraní em Ribeirão Preto – SP. En: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, Boletim de Resumos, 12 p.

**DECISION MAKING UNDER FUTURE CLIMATE UNCERTAINTY:
ANALYSIS OF THE HYDROPOWER SECTOR IN THE MAGDALENA RIVER BASIN, COLOMBIA**

**TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE DE UN CLIMA FUTURO:
ANÁLISIS DEL SECTOR HIDROENERGÉTICO EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, COLOMBIA**

Gómez-Dueñas, Santiago¹; Gilroy, Kristin², Gersonius, Berry¹, McClain, Michael¹

Abstract:

Engineers and decision makers face significant uncertainties in water resources management and planning as a result of climate change. While the availability of climate data is increasing, guidance for interpreting these data and communicating the uncertainty for decision making is lacking. This case study aims to address this need using a different planning approach, applying a bottom-up perspective instead of the traditional top-down one. The study demonstrates the use of climate data in decision making by applying the Collaborative Risk Informed Decision Analysis (CRIDA) method to the hydropower sector in the Magdalena River Basin of Colombia. CRIDA focuses on tailoring a traditional planning process to the problem at hand to avoid over- or under-investing in both the planning process and the final plan. Through a process referred to as the Level of Concern Analysis, the analyst assessed the climate risk and uncertainty involved in the problem at hand. CRIDA then provides guidance corresponding to this assessment.

While CRIDA is a starting point to bridge the gap between climate science and decision making, the Level of Concern Analysis contains a high level of subjectivity and examples are needed. This case study provides a detailed example of the Level of Concern analysis applied to the Magdalena River Basin hydropower system. The sensitivity of the sector to climate change versus other natural drivers, including climate variability and sedimentation, is evaluated, with the goal of determining whether or not climate change is indeed the main threat to the system. After determining that climate change is indeed the main threat, planning options are discussed such as building robustness or flexibility into the system in response to the assessed climate risk. As a result of this work, engineers will have an example application of the CRIDA method and how to communicate climate risks and their implications to decision makers.

Keywords: Decision making, collaborative risk informed decision making, level of concern analysis LOC, vulnerability assessment.

Resumen:

Ingenieros y tomadores de decisiones enfrentan incertidumbres significativas en el manejo y planeación de los recursos hídricos como resultado del cambio climático. Mientras que la disponibilidad de datos sobre el cambio climático incrementa, hacen falta guías para interpretarlos y comunicar su incertidumbre para toma de decisiones. Este estudio de caso pretende abordar esta necesidad desde una perspectiva ascendente, en vez de la tradicional descendente. El estudio demuestra el uso de datos climáticos en toma de decisiones mediante la aplicación de la metodología para toma de Decisiones Colaborativa e Informada del Riesgo (CRIDA por sus siglas en inglés) al sector hidroenergético en la cuenca del río Magdalena en Colombia. CRIDA se enfoca en personalizar el proceso de planeación tradicional del problema a mano para evitar sobre o subestimar invertir en el proceso de planeación y el plan final. A través del proceso denominado Análisis del Nivel de Preocupación, el analista evalúa el riesgo climático y la incertidumbre que implica el problema. CRIDA provee entonces la guía correspondiente a esta evaluación.

Mientras CRIDA es un punto de inicio para unir la brecha entre ciencias climáticas y la toma de decisiones, el Análisis del Nivel de Preocupación contiene un alto nivel de subjetividad y se requiere de ejemplos. Este estudio de caso provee un ejemplo detallado del Análisis del Nivel de Preocupación aplicado al sistema hidroenergético de la cuenca del río Magdalena. La sensibilidad del sistema es evaluada frente al cambio climático en comparación con otros factores naturales, incluyendo variabilidad climática y sedimentación con el fin de determinar si el cambio climático es en efecto la mayor amenaza para el sistema. Luego de determinar que el cambio climático es de hecho la mayor amenaza, las opciones para planeación son discutidas como construir robustez o flexibilidad como respuesta al riesgo climático evaluado. Como resultado de este trabajo, los ingenieros tienen un ejemplo de aplicación del método CRIDA y cómo comunicar riesgos y sus implicaciones a los tomadores de decisiones.

Palabra clave: Toma de decisiones, toma de decisiones colaborativa e informada del riesgo, Nivel de Análisis de Preocupación LOC, evaluación de vulnerabilidad.

¹ Department of Water Science and Engineering, IHE Delft Institute for Water Education, PO Box 3015, 2611 AH Delft, the Netherlands. E-mail: santiagogomezdz@gmail.com

² International Centre for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM): Institute for Water Resources, 7701 Telegraph Road, Alexandria, VA 22315 USA.

1. INTRODUCTION:

Climate Changes raise several key challenges regarding social and sustainable economic development. However, decision-makers face some issues when understanding and giving an effective response to them. In fact, those changes imply non-stationary conditions on the climatic system, greatly affecting the decision-making processes by either the private or public sectors and bringing in to the equation an increase in uncertainty for GCMs projections and new climate scenarios. It is therefore necessary to understand better how to structure better the decisions made. Facing those uncertainties is not easy, especially because we have not been dealing with something even close before. It is a very complex problem with consequences within different time horizons, characterised by uncertainty and risks. However, that is the main goal: take the risk for a climate resilient strategy. Moreover, gathering science, management and policies is a must and it implies understanding first their correlation and thus, building methodologies in which every role-player could contribute from their responsibilities and perspective (UNESCO, 2016).

Nevertheless, in water management decision making processes, the dominant perspective have been done based on analysis like the cost-benefit ratio and multi-criteria decision analysis among others. This perspective has a limitation and is the bounded rationality that drives the decision-maker to use a hierarchical division of the problem in order to solve them one by one (HFIDTC, 2007). Decision-making in water management is needed to involve risks and uncertainties to the whole context in order to have a clearer idea of the system and the implications of the decision made. This guarantees a better understanding of the system, the acceptance of the ranges within the uncertainty do the variables be and the risk that implies a future scenario that will be different from the past ones (Middelkoop, H et al., 2004). Therefore, if water managers keep applying a practical guidance for all the planning stages challenges, including a non-stationary climate condition, must not underestimate uncertainties that are intrinsic to them. In that sense, if a methodology is available involving those components, especially uncertainty, should also allow to revise the planning steps and in that case, reformulate actions if necessary in order to fend off an undesirable performance either current or expected (USACE; Deltares, 2016)

When basing on a stationary climate setup as a decision-making method, uncertainties are avoided and this assumption seems to oversimplify the problem. It has to be pointed out that most of the management ideas around a better hydrological knowledge are recent (less than 20 years) and that concepts such as trends, uncertainties, resource pressure, etc., have been developed based on the current climate comparison with the past one and the ongoing climate changes projected for the

future (USACE; Deltares, 2016). That methodology is equivalent to the traditional planning method, also known as top-down planning approach. The bottom-up planning approach on the other hand is a novel method that, although starts its analysis in the same fashion the top-down approach does: 1) identifies vulnerabilities, 2) accepts natural climate variability, 3) looks for key impacts and possible system stressors of concern and 4) identifies stakeholders participation at various stages, it does not seek for a deterministic assessment of uncertainties; rather, this approach gives an analytical framework useful for decision-makers to identify the impact of the uncertainties, which are important from their perspective and how the system is sensible to them, considering the whole range within climate information is (Brown, 2011), which is the one this article is focused on to apply.

Thereupon, exists a framework able to deal with the current necessities decision-makers have and provide an approach different to the traditional paradigm denominated: Collaborative Risk Informed Decision Analysis – CRIDA. CRIDA has been developed to answer the decision-making necessities: provide the best possible insight being aware of the uncertainties, as well as look for an effective and risk-informed decision for water resources management (Mendoza et al. 2018). The method depends on a vulnerability assessment to the multiple dynamic factors that can be game changers when making decision such as changes in the hydrological cycle, population growth, changes in land-use and land-cover, etc. As well, CRIDA provides an analysis of the risks and inform the decision-makers about them, meaning that CRIDA acknowledges the implications of the decision-making process when the management is based on risk-based metrics under non-stationary conditions.

CRIDA provides the analyst with guidance to assess system vulnerability to drivers such as climate change and climate variability, and use this assessment to tailor the remaining steps in the water resources planning process as needed. For example, a system that is highly sensitive to climate, and has already observed changes in the local climate, should consider designing for a projected future climate rather than the observed climate, as would be advised in a standard water resources planning process. In the CRIDA method, this is referred to as a strategy direction that builds robustness into the system. On the other hand, a system that is moderately vulnerable to climate, but lacks an understanding of observed climate trends, might prefer to design adaptation pathways which would allow decision makers to implement measures over time while observing changes in the key system drivers, thus avoiding over- or under-investing. The CRIDA method refers to this approach as an adaptive strategy direction. With each strategy direction comes guidance for economic analyses as well as institutional and financial requirements. These three guidance elements are illustrated through the CRIDA decision matrices.

While the CRIDA method is a starting point to improve guidance for engineers and decision makers in water resources planning, available case studies demonstrating the CRIDA concepts are limited (Gilroy and Jeuken, 2018). The goal of this work is to demonstrate for readers the link between a climate vulnerability assessment and the CRIDA decision matrices and, therefore, decision making under uncertainty for water resources planning. This case study builds on the previously conducted vulnerability assessment for the hydropower sector in the Magdalena River Basin of Colombia (Gomez-Dueñas et al., 2019). Through examples, such as this case study, engineers and decision makers will become more skilled at incorporating uncertainties, such as climate change, into the decision making process for water resources planning through the CRIDA method.

2. METHODOLOGY:

The CRIDA method follows a standard planning cycle and inserts guidance matrices at three decision points throughout the process, as illustrated in Figure 1. As previously discussed, the Decision Points provide the analyst with guidance regarding strategy direction (i.e., robust vs flexible), economic analyses, as well as institutional and financial requirements for implementation. The guidance aims to tailor the planning process based on the system vulnerability to climate uncertainty. It also provides a mechanism for communicating the implications of uncertainty to decision makers. The CRIDA *Decision Matrices* are shown in Figure 2.

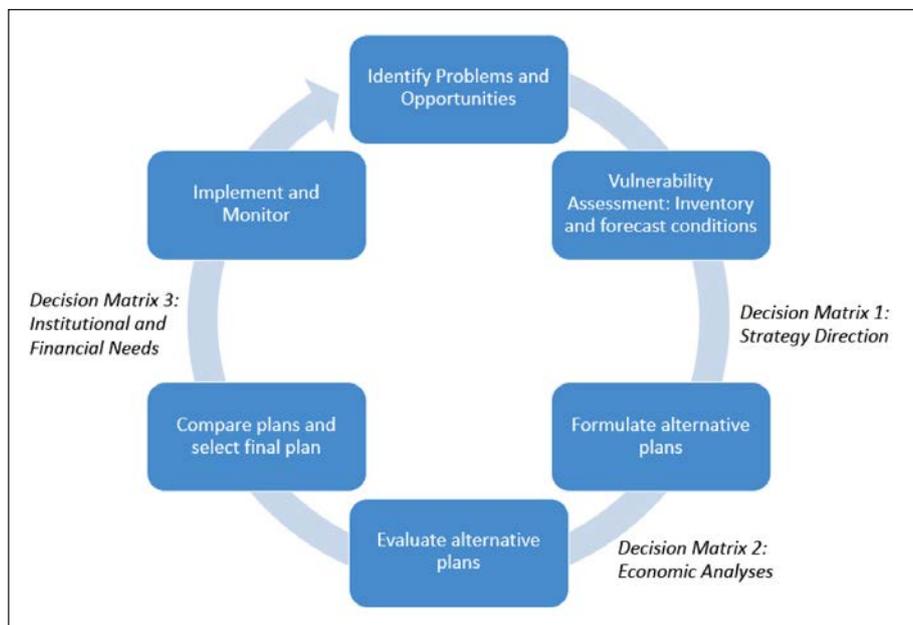


Figure 1. Traditional Water Resources Planning Cycle with CRIDA Decision Matrices

In addition to the *Decision Matrices*, the CRIDA vulnerability assessment deviates from traditional planning by following a *Stress Test* approach. Through a *Stress Test*, system performance is tested using driver values that extend beyond those previously observed or projected. Given the great amount of uncertainty in available data, this approach allows the analyst to better understand system vulnerability to drivers such as precipitation before limiting the range of values tested to the data available. The LOC Analysis uses the *Stress Test* results to determine (1) the *plausibility* of entering a vulnerable state or passing a defined performance threshold during the planning horizon; (2) the *consequences* of entering a vulnerable state; and (3) the *analytical uncertainty* in the data used to make these assessments. The *Level of Concern (LOC) Analysis* provides the link between the *Stress Test* and the *Decision Matrices*.

The *Consequences* of unacceptable system performance can often be defined based on the problem or opportunity statement. In general, consequences regarding a water supply project are less severe than flood risk management problems, as flooding occurs rapidly with little response time. Likewise, urban flood risk deals with life loss while agricultural flood risk may be more manageable through measures such as insurance. For hydropower, if an alternative energy source is not available, the consequences of system failure would be considered greater than if back-up plans are readily available. The analyst should consider these elements when assigning a low, medium, or high level of consequences to the problem at hand. If multiple projects are being assessed simultaneously, it is sometimes beneficial to report these assessments in relative terms across projects.

In regards to *plausibility*, the analyst must assess the likelihood that the system will perform unacceptably during the defined planning horizon based on all available data and information. Often times, the system is already failing, hence the call for a project. In this case, the analyst is evaluating how sensitive the system performance is to each driver and, therefore, how important uncertainty is in the decision making process. Can we plan based on observed data and feel confident in the system performance for the planning horizon? Or should we consider flexible plans, such as adaptation pathways, or more robust plans which are designed for a future climate?

The analyst can assess plausibility by answering the following questions: (1) Does the stress test suggest that a climate change metric is the most sensitive driver? If no, then drivers with less uncertainty are of greater concern and plausibility is low. Traditional planning approaches based on observed data would be appropriate. If yes, then: (2) Do observed data suggest a shift in towards a more vulnerable climate? And (3) Do projected data suggest a shift

towards a more vulnerable climate? The more the data suggests a shift towards a vulnerable climate, the greater the plausibility score. The combination of *Consequences* and *Plausibility* provides the analyst with a low, medium, or high ranking of *Future Risk*, which is the y-axis of the Decision matrices.

The purpose of assessing the *Analytical Uncertainty* is to determine the reliability of the data upon which decisions are being made. For example, observed data has lower uncertainty than projected data. Projected temperature data has lower uncertainty than projected precipitation data. And projected annual means have lower uncertainty than projected extreme events. *Analytical Uncertainty* can also be assessed based on the agreement between all available data sources. If the available general circulation models are not an agreement, then there is a high analytical uncertainty regarding future projections. The low, medium, or high assessment of *Analytical Uncertainty* places the problem along the x-axis of the decision matrices, with higher *Analytical Uncertainty* leaning towards more adaptive strategies.

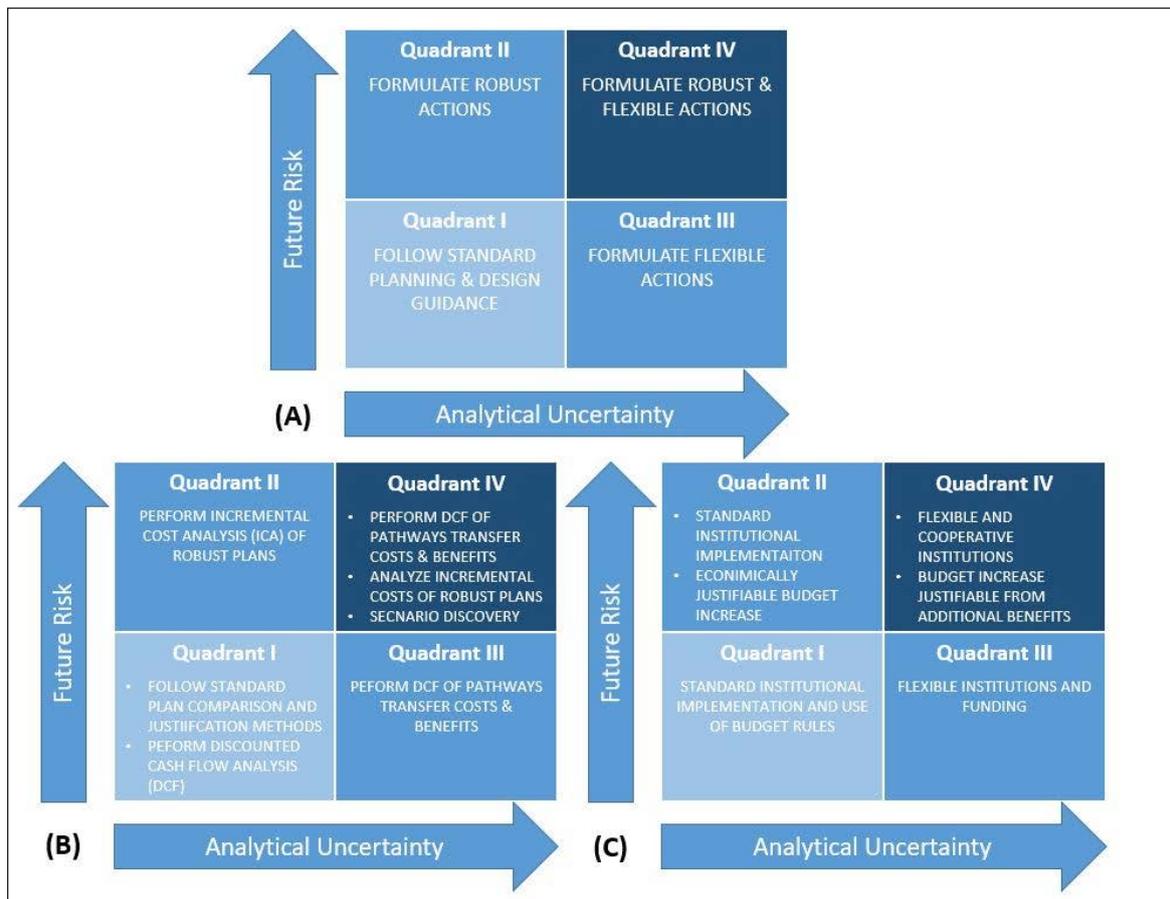


Figure 2. CRIDA Decision Matrices: (A) Strategic Direction (B) Economic Analyses (C) Institutional and Financial Requirements

As a result of the level of concern analysis, the engineer or analyst is then able to place the problem at hand into one of four quadrants in the CRIDA decision matrices, shown in Figure 2. These decision matrices guide the analyst or engineer through the

development of a strategic direction best fit to the problem at hand as well as the necessary economic analysis method and institutional as well as financial requirements to implement the developed plan (Mendoza et al., 2018). As previously mentioned,

this paper focuses on the Level of Concern Analysis based on a previously conducted vulnerability assessment for the hydropower sector in the Magdalena River Basin in Colombia. As the Level of Concern Analysis contains a significant amount of subjectivity, examples such as this case study will be critical to aid analysts and engineers who are required to consider uncertainties, such as climate change, in the water resources planning process.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Hydropower is the main energy source in Colombia and has strategically positioned the country as a referent in terms of energy production in Latin America (Foro Nacional Internacional, 2012). The country takes advantage of its geographical position,

topographical conditions and water availability to base its production applying a clean energy matrix and that bases the production on the usage of water for that purpose, leaving oil and coal fields as a system backup rather than being the primary energy source. Additionally, there are plans to upgrade the current infrastructure with some works in order to increase income discharges to the reservoirs (ACOLGEN, 2012) due to unexpected lower performances (Mariño, 2007). Consequently, Colombia has been looking to increase the investments in the hydropower sector and accomplish the plans proposed. Most of the new contemplated hydropower infrastructure will be located over the Magdalena Basin as shown in Figure 3. The Magdalena River's length is 1,612 Km, and the whole drainage area is approximately equal to one fourth of the total country area, hence the main fluvial branch of Colombia (Restrepo, 2000).

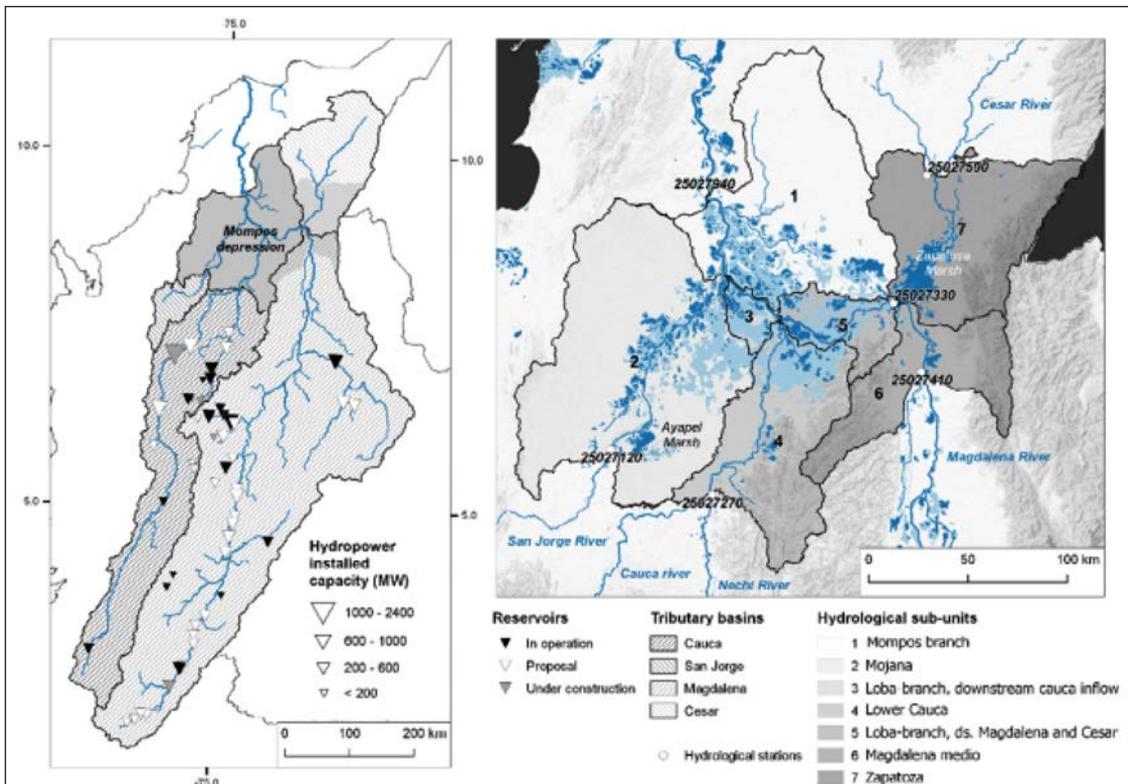


Figure 3. Hydropower infrastructure: current and projected over the Magdalena river basin (Angarita et al., 2015)

The tropical South American region is influenced by the ENSO extreme phases, affecting primarily the interannual hydro-climatological conditions and several studies support that statement (Restrepo, 2000). However, since many studies have been carried out focusing on the interannual variability and the ENSO effects on rainfall and river discharges, the Magdalena have received scarce attention and still the impacts on the basin remain uncertain, adding to the well-known climate change effects. Additionally, the Magdalena basin is naturally susceptible to erosion (Restrepo et al., 2006), being orography the major

controller. The sediment yield varies parallel to the rainfall patterns and thus for a non-stationary climate, a non-stationary sediment transport. Furthermore, as the reservoirs are located at the upper-basin in the mountainous area, they act like a sediment trap and their influence is considerable for the sediment balance along in the reaches; however, as sediment is retained in the reservoirs, their storage diminishes and hence the energy production.

It is useful to know when the system breaks based on the external drivers mentioned above: climate change, climate variability and reservoir sediment

retention. By varying the parameters, a vulnerability assessment is carried out by comparing results and determining to which driver the system is more sensitive. Stress test results indicating that the main system driver is not climate change will greatly simplify the planning process and decision making. Otherwise, the level of concern decision matrices can be used to guide the analyst through the planning process.

A. Stress Test Results

As previously mentioned, an in-depth explanation of the Stress Test methodology will be provided in (Gomez-Dueñas et al. 2019). The goal of this research is to demonstrate interpreting the results for decision making. The results are shown in Figure 4 and Figure 5 for climate and sediment drivers, respectively. Figure 4 shows the climate response surface, with the X-axis representing climate change and the Y-axis representing climate variability. Climate change was simulated by incrementally reducing the annual mean precipitation of the reference record (1970-2013) to represent a drier climate. Climate variability was simulated by bootstrapping the reference record to explore the system sensitivity to observed precipitation events with different frequencies. For example, if the

most severe drought occurred multiple times in the period of record, how would the system performance change? 10 000 samples were bootstrapped and percentiles were calculated based on the severity of the droughts in each bootstrapped sample. The colour bar represents the energy ratio of the scenario modelled energy output over the reference case, with white representing almost no change from the reference scenario and dark red representing up to a 30% reduction in energy production.

Selection of any point within the response surface represents the energy output ratio resulting from the corresponding climate change reduction on the X-axis and climate variability percentile on the Y-axis. A comparison of the colour grade change in the horizontal direction vs. the vertical direction indicates that the system is significantly more sensitive to the range in climate change tested than to the climate variability scenarios. This indicates that climate change is the more important of the two drivers and should not be ignored in the planning and decision making process. However, this conclusion depends on entirely on the plausibility of the ranges selected for the climate change variable. This will be evaluated in the Level of Concern Analysis.

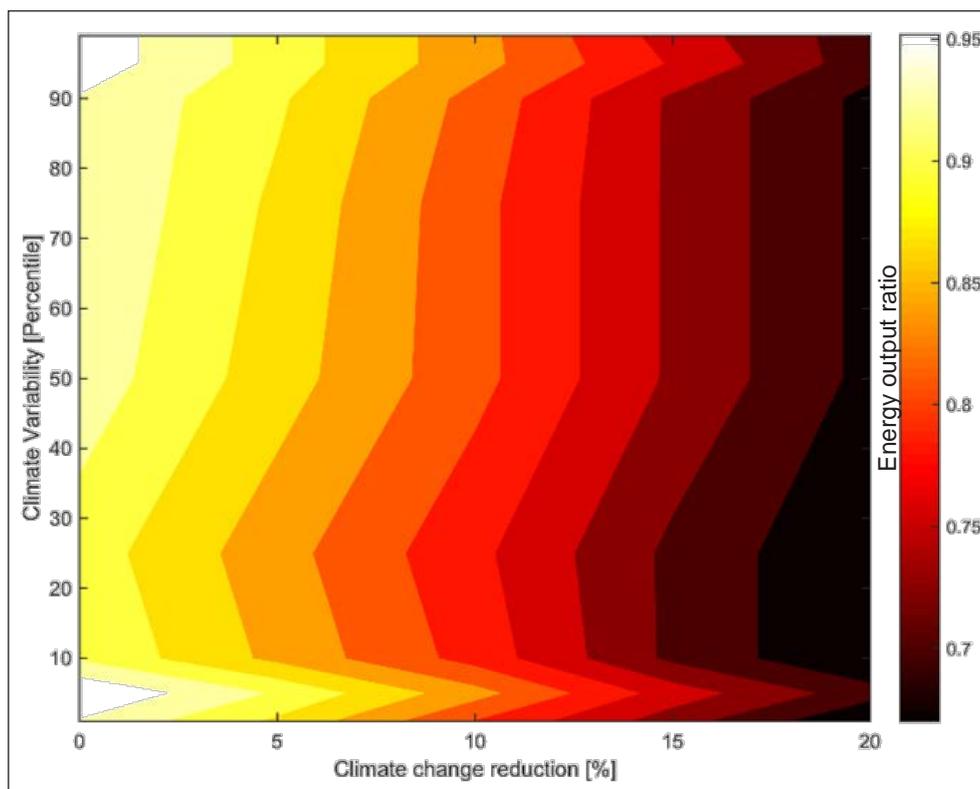


Figure 4. Climate Stress Test. Average – Mean annual method

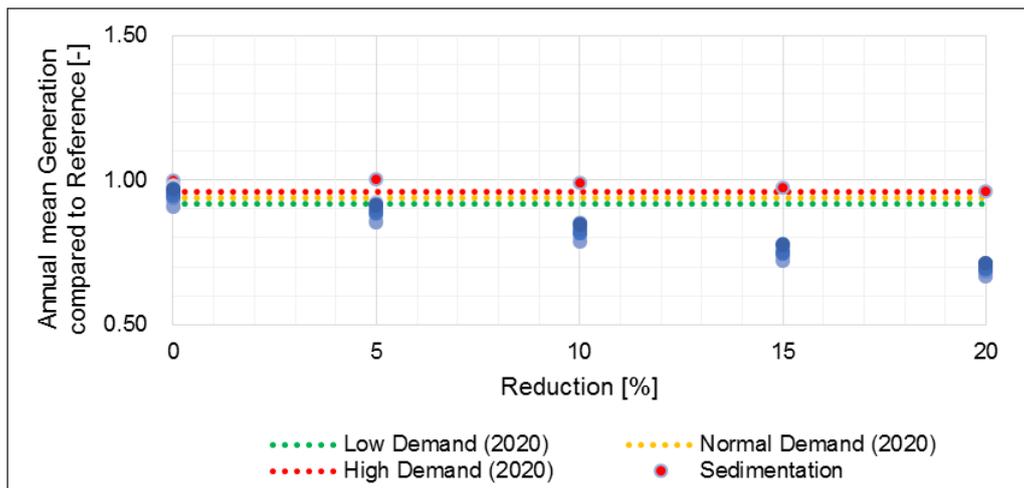


Figure 5. Stress test among the natural drivers. Average – Mean annual method

The next step in the stress test phase was to compare climate change (the main driver of the two climate variables) to sedimentation, illustrated in Figure 5. The x-axis refers to the reduction in the driver ranging from 0 to 20%. For the red dot series, this reduction refers to the reservoir storage due to sedimentation. For the blue dot series, this reduction refers to precipitation to illustrate the climate change and their climate variability percentile scenarios from the first stress test. In order to see the results compared to a threshold, the low, normal, and high energy demand scenarios for 2020 are plotted. Note that later year energy demand projections have energy ratio-demands significantly greater than the values contained in Figure 5, meaning that the system is already failing to meet demand projected for 2020.

The sedimentation stress test indicates that climate drivers have a lower energy ratio than the sediment retention drivers. In the worst scenario possible for sediment retention, the values are below just 6% compared to the Reference case, while climate drivers for the same reduction percentage (20%), show a difference by 31% to 37%, around 5 times less. For the other reduction percentages (0% to 15%), the performance is acceptable even for the highest demand scenario. Hence, based on the results and comparing different system vulnerabilities can be concluded that the main natural driver is the climate change over the sediment retention in the reservoirs. Again, this conclusion depends entirely on the plausibility of the climate change range analysed, which will be evaluated in the Level of Concern Analysis.

B. Plausibility Assessment

The goal of the Level of Concern Analysis is to evaluate the Future Risk and Analytical Uncertainty of the problem at hand in order to select one of the four quadrants in the Decision Matrices. The preliminary evaluation of the stress test indicates that climate change is the main variable driving system

vulnerability. By evaluating the plausibility of the ranges evaluated, an assessment of future risk can be made. The followings are the analysis carried out for the natural drivers involved.

Climate variability is the one that controls intensity and frequency of the extreme events such as heavy rainfalls, overflows, flood-drought conditions, etc. that cause great social and economic impact to the country (IDEAM-UNAL, 2018). Its interannual variation is caused by El Niño Southern Oscillation – ENSO. During El Niño Events, there is a diminishment in precipitation in the Caribbean and mid-Andean and north-Pacific regions, whereas in the Orinoquian and Amazonian foothill regions, happens the opposite. Due to the nature of the business, hydropower's main input is water and during El Niño events, is when the most critical conditions occur. In Fig. 6 can be seen the most recent available studies for anomalies effects due to El Niño events. Along the Andean region, where the hydropower plants are located, it is expected to have a deficit in precipitation within 40 to 80%, showing that the infrastructure is susceptible to water shortages.

On the other hand, the most recent version of the Climate Atlas for Colombia (IDEAM, 2018) concludes that for precipitation, it is expected to decrease within 5 – 10% in the Caribbean and centre and northern Andean regions, where overlaps with some hydropower facilities for the period 2011-2070. For the southern Andean and Pacific regions, the expected increase will range between 5-15% for the same period. Additionally, after a warm-day analysis, these tend to increase all over the country, creating a drier context for hydropower plants to be performing on. The climate change projections were obtained using the new RCP scenarios (2.6, 4.5, 6.0 and 8.5) available for the CMIP5 project and for precipitation, a REA assemble was carried out for the four scenarios. In the Fig. 7 and 8, it can be seen the general precipitation trends for the 2011-2040 and 2040-2070 periods.

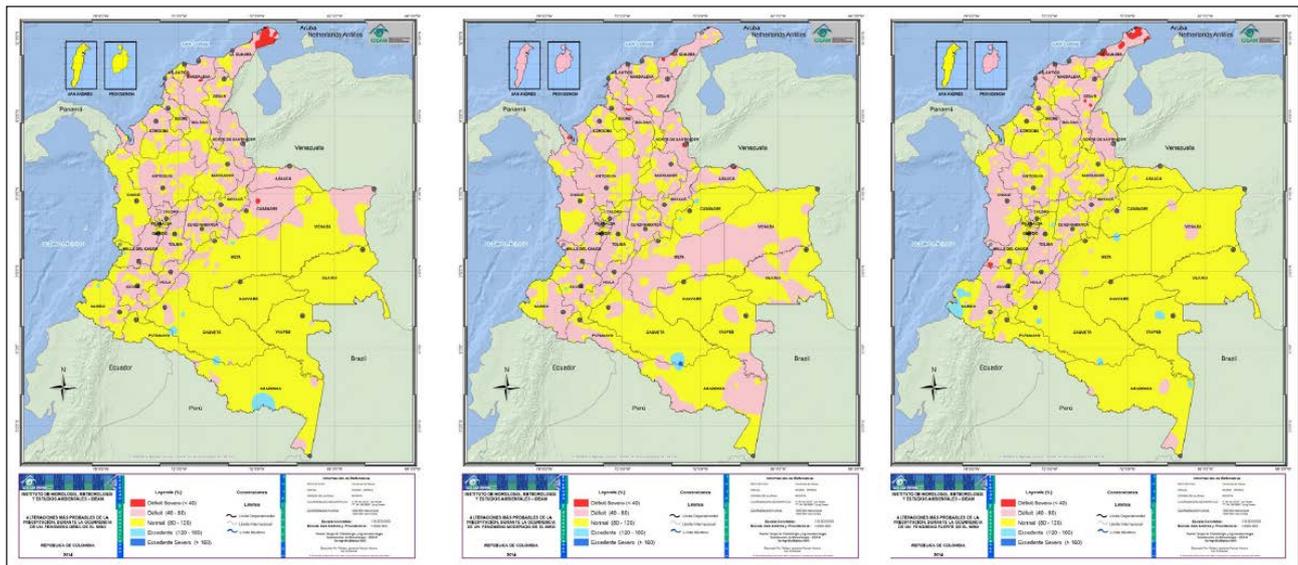


Figure 6. Precipitation anomalies distribution due to a weak (left), moderate (centre) and strong (right) El Niño event (Montealegre, 2014)

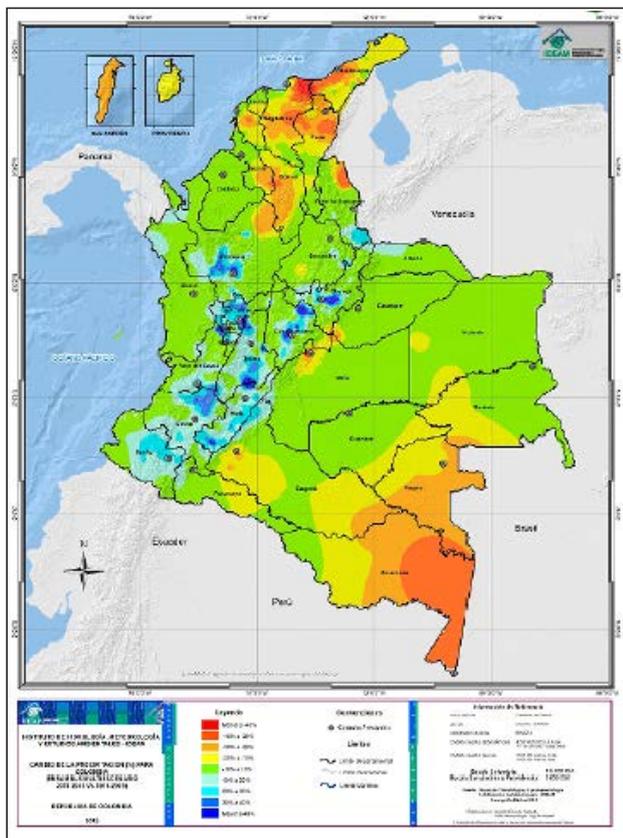


Figure 7. Precipitation change (%) for the period 2011-2040 (IDEAM, 2018)

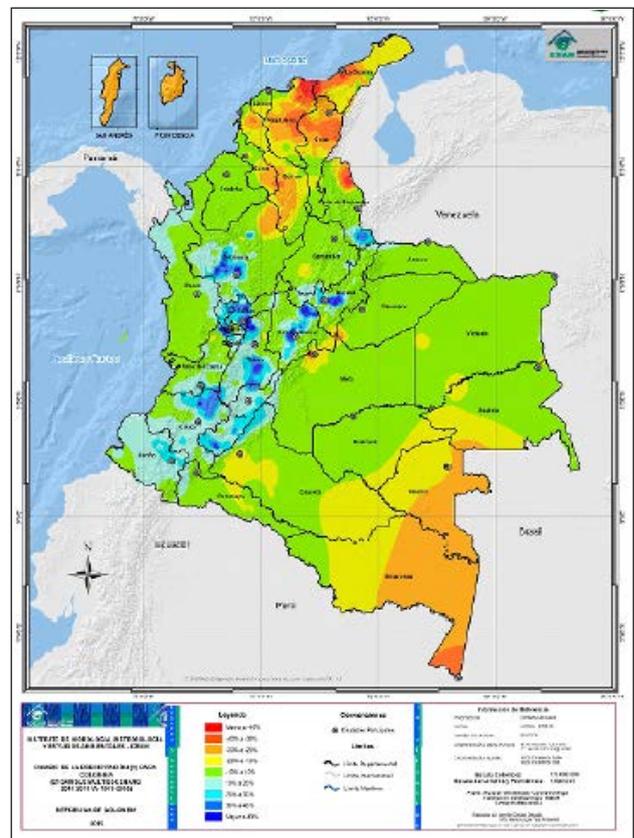


Figure 8. Precipitation change (%) for the period 2040-2070 (IDEAM, 2018)

On the other hand, GOTTA (2016) did a geomorphological characterization of the streams, as well as they computed the whole sediments balance over the Magdalena basin. For reservoir retention – Rx were compared the methodologies developed by Brune’s empirical curve (1953) which is a very well-known method with almost 44 different records used for this study, Morris (1963) that proposed a

relationship between the retention efficiency (TE) over the ratio between storage and income discharge (C/I) and Heineman (1981) who modified Morris’ expression based on whether the reservoir drainage area is larger or smaller than 38.85 Km² (15 Mi²) and therefore the Brune’s curve has smaller or larger retention efficiencies respectively. Fig. 9 represents the computed Rx for the 1970-2013 time period.

Plausibility

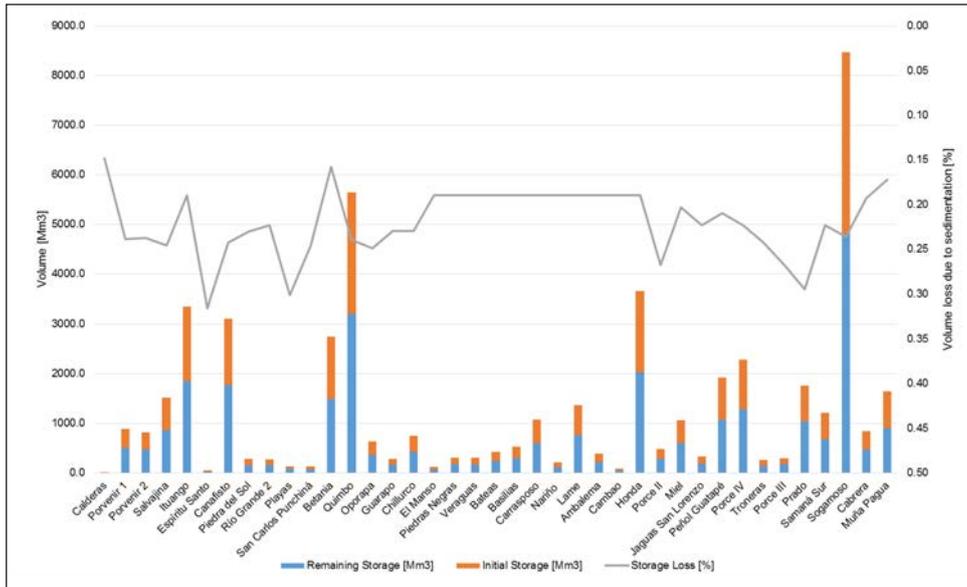


Figure 9. Sediment retention for each reservoir for the period 1970 – 2013. (Gómez-Dueñas et al, 2017)

Level of Concern Analysis

As CRIDA is a risk-based approach, the first step is, in a qualitative way, to put together the elements that involves the risk concept from a bottom-up vulnerability perspective. Thus, impacts, plausibility and uncertainty are assessed in this step. Impacts assessment depends on the thresholds surpassing brought off in the performance metrics assessment. Plausibility are based on how likely the variables ranges are based on the available information (or the methodology used to get the system stress ranges. Uncertainty is based on the quality of the data used to make this assessment. Table 1 provides an overview

of the level of concern analysis for each variable analysed.

Based on the summary provided in the Table 1, the next step is to plot each driver in the Level of Concern Risk matrix, shown in Figure 10. As the plausibility is high for all three natural drivers, all variables are plotted on the right of the figure. However, the impact varies significantly across the three drivers, as was discussed in the stress test results. As a result, climate change poses a high future risk, climate variability a medium/high future risk, and sediment retention a medium future risk.

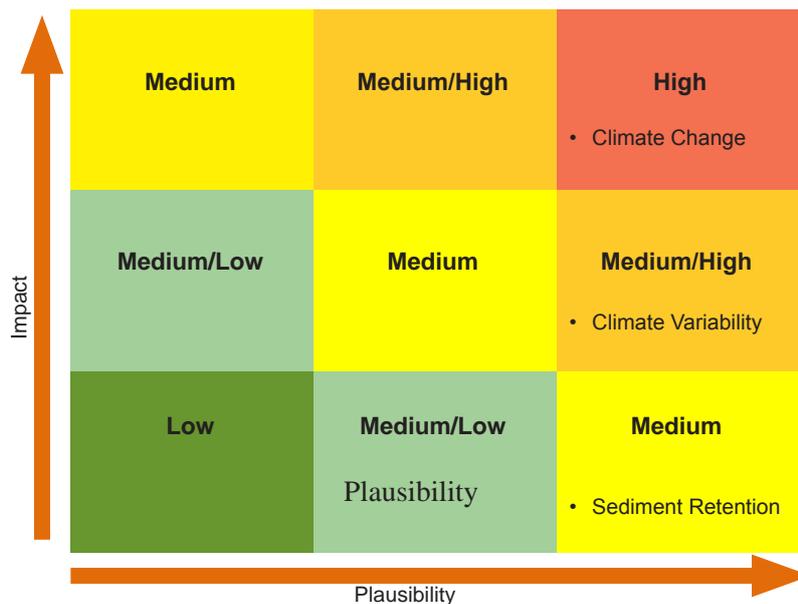


Figure 10. Level of Concern Risk matrix

Table 1. Level of concern matrix

Variable	Impact	Plausibility	Uncertainty
Sediment retention	Acceptable performance. Although the results show 6% less energy production than in the Reference case, it is not as representative as for the climate drivers. The energy generation will not depend on the sedimentation rates but in the climate conditions and reservoir network setup.	High. The sediment rates computed for the reservoirs within the basin range within 15% to 30% for the time period chosen for the modelling. That means that the reported rates (GOTTA, 2016) are greater than the scenarios modelled. Hence, it has to be run the model with greater values in order to stress the system beyond the reports.	Low. Based on bathymetries already carried out in the basin, the sediment retention rates have been calibrated.
Climate Variability	Mostly acceptable performance. The performance does not depend on a drier-wetter climate condition. For wetter climates the energy production is greater than for the Reference case	High. Bootstrapping carried out based on already seen climate.	Very Low. This climate has been already seen in the basin.
Climate Change	Unacceptable performance. Is the main climate driver, among the different rainfall reduction scenarios the system was being more unable to meet any current or projected demand	High. The GCMs for precipitation, it is expected to decrease within 5 – 10% in the Caribbean and centre and northern Andean regions, where overlaps with some hydropower facilities for the period 2011-2070. For the southern Andean and Pacific regions, the expected increase will range between 5-15% for the same period. The climate change projections were obtained using the new RCP scenarios (2.6, 4.5, 6.0 and 8.5) available for the CMIP5 project and for precipitation, a REA assemble was carried out for the four scenarios (IDEAM, 2018) Additionally what adds plausibility to this driver is the fact that when comparing the energy ratio between the percentiles for climate variability and the values obtained for climate change, the values from the mid/lower percentiles are the values for the immediate following climate change scenario in its higher percentiles. This means that not necessarily the impact may be seen only from a vertical or a horizontal perspective, but also what is a drier climate at a certain rainfall reduction scenario, can be a wetter climate in the following climate change scenario and still have the same performance.	High. The scenarios are likely to happen. The reference GCM information is for the RCP scenarios (2.6, 4.5, 6.0 and 8.5). However, it is difficult to determine whether a climate anomaly is due to climate variability or climate change.

The last stage of the Level of Concern Analysis is the Decision matrix. It complements the risk assessment by adding the analytical uncertainty element. The final quadrant selected for each driver will provide

recommendations for future planning stages. Figure 11 shows the decision quadrants outcome for each driver analysed.

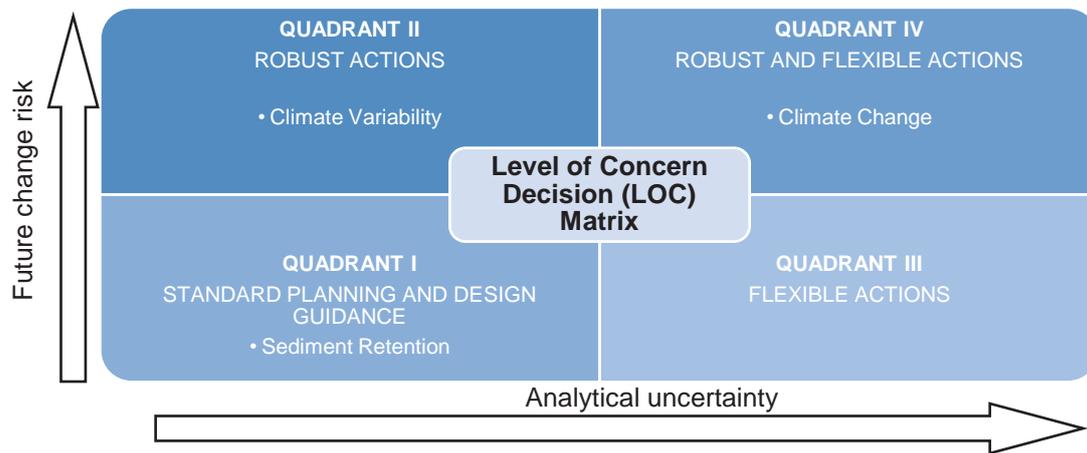


Figure 11. Level of Concern Decision Matrix

The results show a scattered behaviour for the natural drivers taken into account for this research. For the climate drivers the action must be to follow a robust decision making. This means that investments may be more costly due to the high risk they represent for the system performance.

Sediment retention represents a lower risk for the system than the climate drivers. There is a limited evidence that in the future either the risk will change from the values modelled. Compared to climate drivers, the effects this driver has on the system performance is low. In addition, the changes in storage are well understood, because observed data is available for the sediment driver from bathymetries since the reservoirs started to be built around the 70s, as well as suspended solid measurements over the river that indicate the ranges within the sediment balance is varying. Hence, the strategy direction for sediment retention is not required to be deviated from the standard planning approach and for future planning stages CRIDA is not the right approach to be applied.

In the case of the Climate Variability driver, the results indicate medium/high future risk conditions. However, the data used to for this assessment were observed, resulting in low uncertainty. Therefore, the strategy direction for Climate Variability is placed in Quadrant II, recommending slightly more robust solutions than would otherwise be designed. However, since traditional planning often already plans for uncertainty in the climate data, the decision maker could still consider a standard planning process where both certain and uncertain futures are involved at the same time and, therefore, the system risks can be handled.

The Decision Matrix quadrant differs significantly, however, for the Climate Change driver due to the high uncertainty and high impact this driver has on the system. For this reason, a combination of robust and flexible actions would be recommended. Flexible actions allow shifts from one decision to another at any stage through the planning horizon and still keep and be able to meet the objective function. Robust actions mean that decision making was made by

analysing both observed and future climates to determine whether no regret options were available. Consequently, the strategy direction for Climate Change might be given for different scenarios and possible linkages between them, allowing the flexibility to follow a certain decision path until there is enough evidence either to confirm the decision correctness or to change for a more accepted one regardless.

4. CONCLUSIONS

A new approach to project planning was put into practice by determining a set of thresholds to enhance the hydropower generation in the study area. The method better incorporates inherent uncertainties, such as climate variability or change, into the decision-making process. Traditional approaches favor a "predict and act" method, meaning the analyst evaluates the performance of the system according to available observed data, or in some cases future projections if available or specified by existing policy. However, this limits the decision space to the available information which is known to contain uncertainties. As a result, the decision maker risks over- or under-designing the system under both current and future conditions.

After having applied the CRIDA method for this vulnerability assessment, there are some remarks that are necessary to call to. It is important to point out the role the analyst has when applying these concepts, due to will be the one assessing the multiple variables considered among the project. Because the aim is not to neglect climate information available so a relevancy analysis is carried out afterwards, the process depends on how experienced the analyst is, how much the analyst knows the system, its particularities and concern events that may lead to a better understanding of it. Once the problem is understood, opposite to the traditional planning framework, it is required from the analyst to formulate alternative plans and evaluate them, instead of formulating directly robust and flexible actions and then evaluate alternative plans. In conclusion, from the involvement degree of the analyst, as well as from

his/her understanding of the problem and how to deal with the concerns in order to reach the best possible decision, depends the success of the methodology. However, CRIDA gives the tools that will guide him/her to approach better the project.

While the CRIDA method itself is a novel approach, few real-world applications exist. This study also provides greater depth to the Level of Concern Analysis than currently exists in the CRIDA guidance manual. In addition, the application to the Magdalena River Basin builds on the existing method by incorporating climate variability/change to hydropower production, as well as reservoir sediment retention. Next assessments will involve to carry out a temperature and rainfall records available analysis (43 years) at an inter-annual basis which is when the system gets more stressed and define the natural driver to which the system is more vulnerable combined with the natural parameter that makes more sensitive the system. In conclusion, it is necessary to keep elaborating on this research in order to integrate water management methods for decision-making to a study case that aims to be improved in the following years given the alarming expected infrastructure expansion.

5. REFERENCES

ACOLGEN. 2012. El impacto del clima en las políticas energéticas y de desarrollo: lecciones aprendidas. III Congreso Nacional del Clima. Conference Proceedings. Bogotá: IDEAM.

Brown, C. 2011. A Decision-Analytical approach to managing climate risks: Application to the Upper Great Lakes. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. Vol 47. Issue 3. Pp 524-534. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00552.x>

Brown, C., and R.L. Wilby. 2012. An Alternate Approach to Assessing Climate Risks, *Eos Transactions American Geophysical Union*. Vol. 93, Issue 41. Pp. 401-402. <https://doi.org/10.1029/2012EO410001>

Foro Nacional Internacional. 2012. Energía hidroeléctrica: Tendencias en la producción e implicancias para el futuro. Agenda: Suramérica. Volumen 10.

Gilroy, K and Jeuken, A. 2018. "Collaborative Risk Informed Decision Making: A Water Security Case Study in the Philippines". *Journal of Climate Services* (in preparation).

Gomez-Dueñas, S., Gilroy, K., Gersonius, B. and McClain, M. (to be published in 2019). "A Bottom-up Vulnerability Assessment of the Hydropower Generation in the Magdalena River Basin in Colombia".

GOTTA. 2016. Estudio y desarrollo de herramientas para modelación de sedimentos y dinámicas de inundación como complemento a la modelación hidrológica en WEAP, Apoyo en talleres de impactos acumulados por desarrollo hidroeléctrico y propuesta de Hoja de ruta para complementar los estudios. Medellín.

Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., and Maat, J.T. 2013 Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*. Vol. 23, Issue 2. Pp 485-498. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>

HFIDTC, 2007. "Training decision making using serious games". UK Ministry of Defence

IDEAM - UNAL, 2018. "Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia", Bogotá.

IDEAM, 2018. "Atlas Climatológico de Colombia", Bogotá.

Mariño, J. 2007. Civil Engineering and the Deterioration of the Environment in Colombia. *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes. No. 26. Pp. 66-73. <http://dx.doi.org/10.16924%2Fria.v0i26.297>

Mendoza, G., Jeuken, A., Matthews, J., Stakhiv, E., Kucharski, J. and Gilroy, K. 2018. Water resources planning and design under uncertainty: Collaborative Risk informed Decision Analysis. In preparation ICWaRM, 2018.

Middelkoop, H et al. 2004. Perspectives on flood management in the Rhine and Meuse rivers. *River research and Applications*. Vol 20, Issue 3. Pp 327-342. <https://doi.org/10.1002/rra.782>

Montealegre J.E., 2014 "Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Informe de contrato de prestación de servicios profesionales No IDEAM 078 -2014". Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C.

Restrepo, J. 2000. Magdalena River: Interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. Vol. 235. Issues 1 -2. Pp. 137-149. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9)

Restrepo, J. and Syvitski, J. 2006. Assessing the effect of Natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean river: the Magdalena drainage basin, Colombia. *Royal Swedish Academy of Sciences Ambio*. Vol. 35, No. 2. Pp. 65-74. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[65:ATEONC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[65:ATEONC]2.0.CO;2)

UNESCO, 2016. "Toma de decisiones y cambio climático: Acercando la ciencia y la política en América Latina y el Caribe"

UPME. 2016. Proyección de la demanda de Energía eléctrica y potencia máxima en Colombia. Versión 2.0. Bogotá.

USACE; Deltares. 2016. "Water Resources Planning and design for future uncertainties. Collaborative Risk Informed Decision Analysis (CRIDA)". Draft as of October 14. ICIWaRM.

SISTEMA DE MONITOREO HIDROLÓGICO EN TIEMPO REAL PARA EL PARAGUAY

CENTRO INTERNACIONAL DE HIDROINFORMÁTICA. ITAIPU-UNESCO, PARAGUAY

Vera, Santiago¹; Vázquez, Daniel

Resumen

El acceso y la interpretación de datos hidrológicos en la sociedad son problemas que acarrearán varios países donde las tecnologías de la información aún no ganan el suficiente protagonismo. Profesionales de distintas disciplinas, no solo de la comunidad hidrológica, necesitan insumos relacionados a variables hidrométricas para sus estudios, siendo el mayor inconveniente el acceso a los mismos. La información se encuentra dispersa o simplemente no disponibles por falta de tecnologías que permitan difundirlos. Por otro lado, las variables hidrológicas proveídas por entes o estudios, generalmente al ciudadano no técnico es presentada de manera poco comprensible, brindando escasa utilidad de la información para su vida cotidiana. En respuesta a estas necesidades, el Centro Internacional de Hidroinformática desarrolló un aplicativo llamado YRATO, en su primera etapa, permite monitorear variables hidrológicas en tiempo real, como ser niveles hidrométricos, calidad de agua y precipitación satelital a nivel Cuenca del Plata hasta la confluencia de los Ríos Paraguay y Paraná. En esta instancia, el objeto es el de centralizar, visualizar y proveer los datos mencionados de manera ordenada, teniendo como premisa el acceso libre, la interoperabilidad para el traspaso eficiente de datos y la difusión de la información capturada y generada para varios niveles y sectores de la sociedad con fines diversos. Luego de su completo desarrollo (pendiente), la aplicación busca operar como un sistema de alerta temprana. Los esfuerzos de estructurar esta plataforma permitirán en un futuro próximo acoplar modelos de predicción hidrológica-hidrodinámica disponibles, de manera a confeccionar sistemas de alertas tempranas contra inundaciones. En estas instancias la herramienta es utilizada como un repositorio de información hidrológica, en el cual, tanto instituciones nacionales como la ciudadanía obtiene de manera centralizada, ordenada e interpretada dichos datos para diferentes fines.

Palabras claves: YRATO, monitoreo hidrológico, tecnologías de la información.

Abstract

The access and interpretation of hydrological data in society are problems that involve several countries where information technologies have not yet gained sufficient prominence. Professionals from different disciplines, not only from the hydrological community, need inputs related to hydrometric variables for their studies, the greatest disadvantage being access to them. The information is scattered or simply not available due to lack of technologies that allow it to be disseminated. On the other hand, the hydrological variables made available by entities or studies, generally the non-technical citizen is presented in an understandable way, providing little usefulness of the information for their daily life. In response to these needs, the International Hydroinformatics Center developed an application called YRATO, in its first stage, to monitor hydrological variables in real time, such as hydrometric levels, water quality and satellite precipitation at Cuenca del Plata level until the confluence of the Paraguay and Paraná Rivers. In this instance, the object is to centralize, visualize and make available the aforementioned data in an orderly manner, with free access as the premise, interoperability for the efficient transfer of data and dissemination of the information captured and generated for various levels and sectors of society for different purposes. After its full development (pending), the application seeks to operate as an early warning system. The efforts to structure this platform will allow, in the near future, the coupling of available hydrological-hydrodynamic prediction models, in order to prepare early warning systems against floods. In these instances, the tool is used as a repository of hydrological information, in which both national institutions and citizens obtain these data in a centralized, ordered and interpreted manner for different purposes.

Keywords: YRATO, Hydrologic Monitoring, information technology.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática de disponibilidad de datos hidrológicos y la accesibilidad de ellos a nivel nacional es una limitación importante. El Centro Internacional de Hidroinformática (CIH), en respuesta a esa necesidad desarrolló el aplicativo web YRATO. Este aplicativo en su etapa inicial permite monitorear variables hidrológicas en tiempo real, como ser

niveles hidrométricos de los ríos más importantes del país y precipitación satelital a nivel Cuenca del Plata hasta la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná.

Con la política de uso de software libre y de código abierto y datos abiertos, se empleó una gama de herramientas variadas para el desarrollo del aplicativo.

1 Monitoreo Hidrológico en tiempo real - YRATO <https://hidroinformatica.itaipu.gov.py/yrato/>
Descarga de datos de YRATO <http://geohidroinformatica.itaipu.gov.py/yrato/>
Documentación de servicios ofrecidos <http://hidroinformatica.itaipu.gov.py/docs/>
Servicio de administración de datos <https://hidroinformatica.itaipu.gov.py/admin>

Partiendo con los datos de las estaciones, siempre y cuando las instituciones públicas las haya proveídos de manera abierta, estos son capturados y almacenados en nuestra base de datos de manera sistemática. Para el efecto mediante tareas programadas se han empleado métodos varios de captura, siendo estos Web Scraping y servicios más formales dependiendo de la infraestructura puesta a disposición por los terceros en la difusión de sus datos. La información capturada es publicada en un ambiente web geo-rreferenciado y mediante gráficos interactivos, donde la cantidad y calidad de datos y el estado de transmisión de las estaciones son analizados a cada paso del tiempo a través de simples procesos estadísticos. Los datos geoespaciales varios recopilados como información para soporte técnico son almacenados en una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) propia del CIH. La información de precipitación satelital es recolectada del proyecto Global Precipitation Measurement (GPM) de las agencias NASA-JAXA, con el objeto de supervisar el progreso de la precipitación en tiempo casi-real (delay 6 hs). Esta información es procesada a medida que va entrando a la base de datos (cada 30 min) realizando estadísticas varias por áreas (departamentos, localidades, cuencas, de todo el país), con posibilidad de emitir notificaciones a usuarios claves. A su vez, datos de pronóstico de precipitación, humedad de suelo y temperatura son obtenidos de modelos globales proveídos por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), para ser procesados de la misma forma que los datos recolectados del GPM. Por último, se está avanzando en interconectar el aplicativo YRATO con la plataforma colaborativa Openstreetmap con la finalidad de poder hacer consultas geoespaciales varias, para emplearlos en estudios futuros de análisis de riesgos de inundación.

En esta instancia el objeto de YRATO es el de centralizar, visualizar y proveer los datos mencionados de manera ordenada, teniendo como premisa el acceso libre, la interoperabilidad para el traspaso eficiente de datos y la difusión de la información capturada y generada para varios niveles y sectores de la sociedad con fines diversos. Además, algunos productos básicos fueron el mapeo y cuantificación de cantidad de estructuras afectadas haciendo uso del Modelo de Elevación Digital (SRTM) contrapuesto a los niveles hidrométricos por estación (Asunción, Villeta, Alberdi, Pilar y Ciudad del Este) e información de viviendas de la Dirección General de Encuestas Estadísticas y Censos del Paraguay.

Después de su completo desarrollo (pendiente), la aplicación busca operar como un sistema de alerta temprana. Por lo que esfuerzos de estructurar la base de funcionamiento (datos sistematizados) permitirán pensar en un futuro próximo acoplar modelos de predicción hidrológica-hidrodinámica en conjunto con otras instituciones como la Dirección de Meteorología e Hidrología de manera a incorporar el

factor predicción dentro de la rutina operativa del aplicativo.

2. METODOLOGÍA

El aplicativo Yrato consta de cuatro componentes, Datos libres, Procesamiento, Almacenamiento y Publicación, separadas en base a acciones que garantizan su funcionamiento sistemático con datos en tiempo real. A modo de brindar una síntesis podemos decir que la componente de procesamiento es la encargada de enriquecer la estructura de la base de datos, empleando técnicas innovadoras para la captura y la extracción de datos de diferentes fuentes. Posteriormente esos datos almacenados son moldeados y presentados de manera sencilla, a través de la componente de publicación, mediante el empleo de Frameworks de desarrollo para aplicaciones Web's.

La Figura 1 nos presenta un esquema de funcionamiento entre dichas componentes, dónde, en los siguientes apartados brindaremos mayor detalles de los mismos. Pero antes, necesitamos conocer algunos conceptos que describiremos a continuación:

- **Vectores:** La representación espacial en un modelo vectorial se basa en la localización de puntos individuales según determinadas coordenadas, viniendo definida por funciones matemáticas, por lo que se pueden representar puntos, líneas parábolas, polígonos, etc. [1]
- **Rasters:** El modelo raster representa la realidad a través de superficies determinadas que quedan dispuestas en forma de matriz, en la que cada elemento está representado por un "pixel".[1]
- **GDAL:** es una librería de traductores para tipos de datos geoespaciales raster y vector, que se encuentra bajo una licencia Open Source de estilo X/MIT por la Open Source Geospatial Foundation. Como biblioteca, presenta un modelo de datos abstractos raster simple y un modelo de datos abstractos vector para la aplicación de llamada para todos los formatos admitidos. También viene con una variedad de útiles utilidades de línea de comandos para la traducción y el procesamiento de datos [2].
- **Web Scraping:** es la práctica de reunir datos a través de cualquier medio que no sea un programa interactuando con un API (Interfaz de programación de aplicaciones) [3].
- **JSON (JavaScript Object Notation):** es un ligero formato de intercambio de datos, fácil para los humanos leer y escribir. También es fácil analizar y generar para las computadoras [4].
- **HDF:** El formato HDF es una estructura robusta de almacenamiento y distribución de datos científicos de naturaleza múltiple, y se

utiliza por entidades que producen y gestionan información de carácter ambiental, así como por agencias distribuidoras de datos procedentes de la observación territorial [5].

- **GeoTIFF:** Georeferenced Tagged Image File Format es un formato de archivo libre y estándar basado en TIFF y usado como formato de intercambio para imágenes raster georreferenciadas [6].
- **OpenStreetMap:** es un proyecto colaborativo para crear mapas libres y editables. OpenStreetMap lo crea una gran comunidad de colaboradores que con sus contribuciones al mapa añaden y mantienen datos sobre caminos, senderos, cafeterías, estaciones de ferrocarril y muchas cosas más a lo largo de todo el mundo [7].
- **Geoserver:** es un software servidor que permite a los usuarios ver y editar datos geospaciales, usando estándares libres establecidos por el Open Geospatial Consortium (OGC), dando buena flexibilidad en la creación de mapas y compartición de datos [8].
- **Geonode:** es un Sistema de Administración de Contenidos para datos geospaciales. Geonode es un aplicativo web y una plataforma para el despliegue de una Infraestructura de datos espaciales (IDE) [9].
- **Open Geospatial Consortium:** es una organización internacional no lucrativa comprometida a elaborar estándares para

la comunidad geoespacial global. Estos estándares son hechos a través de procesos de consenso y son libremente proporcionados para su uso, de tal forma a mejorar la compartición mundial de datos geospaciales [10].

- **Infraestructura de Datos Espaciales (IDE):** una IDE es un sistema de sistemas integrado por un conjunto de recursos muy heterogéneo (datos, software, hardware, metadatos, servicios, estándares, personal, organización, marco legal, acuerdos, políticas, usuarios, etc.), gestionado por una comunidad de actores, para compartir información geográfica en la web de la manera más eficaz posible. [11].
- **Frameworks:** en el desarrollo de Software, un framework es una estructura conceptual y tecnológica de soporte definida, normalmente con artefactos o módulos de software concretos, en base a la cual otro proyecto de software puede ser organizado y desarrollado. Típicamente, puede incluir soporte de programas, librerías y un lenguaje interpretado entre otros programas para ayudar a desarrollar y unir los diferentes componentes de un proyecto [12]
- **Django:** es un framework Web en python de alto nivel, que incentiva al rápido desarrollo, limpio y de diseño pragmático. Construido por desarrolladores experimentados, aliviando en gran parte de las molestias de un desarrollo Web para así poder enfocarse en escribir la aplicación sin necesidad de reinventar la rueda. Django es de código abierto [13].

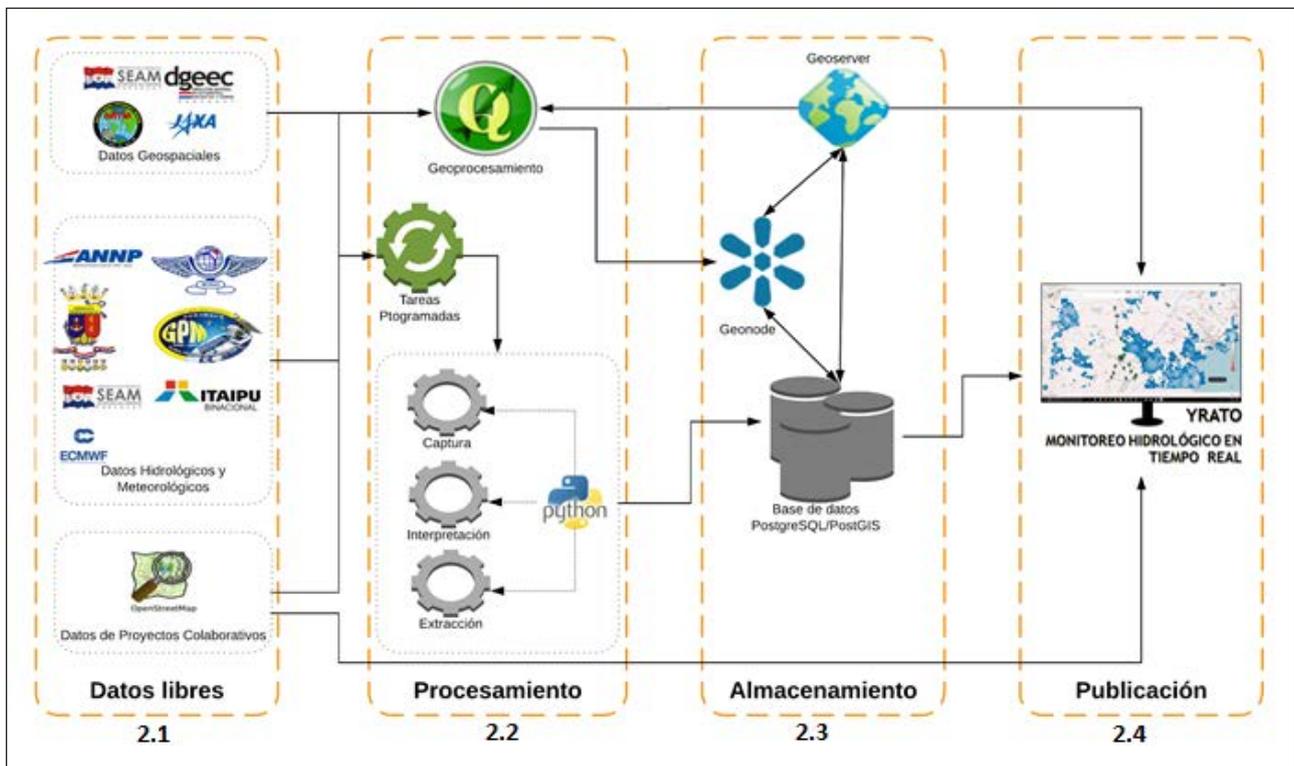


Figura 1. Componentes del Aplicativo Yrato.

2.1. Datos Libres.

Una gran cantidad de información, de todo tipo, abunda hoy en día gracias a las iniciativas de datos abiertos. Por lo tanto, representan un insumo muy interesante de explorar debido a las especificaciones libres para su utilización en cualquier sector.

La utilización de datos libres de tipo geoespacial, hidrológico, meteorológicos y colaborativos proveídos por entes nacionales e internacionales constituyen una componente base y esencial para la plataforma. Esto permite dotar de una mayor escalabilidad en funcionalidades que interconectan variables hidrológicas de un espacio geográfico y analizar su impacto en la sociedad.

2.1.1. Datos Geoespaciales

Datos vectoriales y rásteres, proveniente de diferentes instituciones nacionales e internacionales, relacionadas a límites, topografía, población y cartografía en general serán consideradas como información relevante en las demás componentes.

Algunas fuentes resaltantes utilizadas corresponden a la Dirección General de Estadística, Encuesta y Censos (DGEEC), Secretaría del Ambiente (SEAM) y Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

2.1.2. Datos hidrológicos y meteorológicos

A nivel nacional existen estaciones hidrológicas que van recolectando variables hidrométricas con diferente periodicidad. El histórico de estas variables constituye un recurso importante para la elaboración de estudios en áreas que involucren la gestión integrada de recursos hídricos.

La Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) recolecta información hidrométrica de gran parte de las estaciones hidrológicas pertenecientes a distintas instituciones del país, siendo así, nuestra principal fuente de datos. Por otra parte, la Itaipú Binacional posee estaciones propias con mayor volumen de datos y variables que son anexadas, junto con otras estaciones del Brasil difundidas por la Compañía Paranaense de Energía (COPEL) y la Agencia Nacional de Agua (ANA).

A través de la misión satelital llevada a cabo entre la NASA y JAXA denominado Global Precipitation Measurement (GPM), es posible contar con datos de intensidad de precipitación a nivel mundial en tiempo casi real con un retraso de 6 horas y en intervalos de 30 minutos [15]. Esto permite conocer la precipitación en cualquier espacio geográfico proporcionando información de entrada para análisis y modelado.

La European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) es una organización intergubernamental independiente soportado por 24 estados. El centro es un instituto de investigación y servicio operacional, produciendo y disseminando predicciones meteorológicas numéricas a los países miembros [14]. A través de la ECMWF es

posible obtener pronósticos de diferentes variables meteorológicas a nivel mundial, lo cual nos permite adicionar a nuestra base de datos información pronosticada de precipitación, temperatura y humedad de suelo ampliando los insumos disponibles para análisis y modelado.

2.1.3. Datos de proyectos colaborativos

La mayoría de los datos geoespaciales no se encuentran libres para su utilización y en otro caso si lo estuvieran, existe el problema de la desactualización que van ligados a costos económicos para su mantenimiento. Por ello, la tendencia es utilizar datos provenientes de proyectos colaborativos a nivel mundial, donde su principal potencial sea la iniciativa y entusiasmo de sus colaboradores por aportar datos útiles pertenecientes a su comunidad.

OpenStreetMap es el proyecto colaborativo utilizado por cumplir con los criterios descritos con anterioridad.

2.2. Procesamiento

Los diferentes datos de relevancia a ser determinados para su utilización se encuentran disponibles en estructuras estáticas o crudas, dificultando su uso y actualización en el entorno de funcionamiento de herramientas que lo necesiten. Por lo que, la componente de Procesamiento pretende actuar de un intérprete, captando y extrayendo de manera sistemática datos primitivos a una estructura simple ante las aplicaciones.

La componente de procesamiento es realizada con una frecuencia diaria en diferentes intervalos horarios, dependiendo de la disponibilidad de los datos.

El lenguaje de programación utilizado para el desarrollo de la componente es Python, por su sintaxis simple y amplia flexibilidad ante el manejo de datos geoespaciales. Para el manejo rásteres es utilizada la librería GDAL.

2.2.1. Captura

Las informaciones contenidas en la componente de datos libres se encuentran dispersos en diferentes repositorios y medios de distribución. Este procedimiento tiene como tarea capturar y disponibilizar los datos internamente para ser interpretados.

La DMH, COPEL y ANA publican datos hidrométricos en sus portales Web, exhibidos de una manera tabular (Tablas). Por lo que, al no existir una interfaz de distribución de la información, fue necesario la descarga completa de la sección del sitio para su interpretación.

Los datos provenientes de Itaipú, GPM y el ECMWF cuentan con interfaces definidas para el acceso a la información (Servicios Web). Esto facilita la descarga e incorporación al ambiente del aplicativo.

2.2.2. Interpretación

Los datos capturados se encuentran con estructuras heredadas de su medio de distribución. Por ello, este proceso actúa de un intérprete que transforma los datos crudos a simples, facilitando su inserción a una estructura de almacenamiento diseñada.

Para los datos de la DMH, COPEL y ANA es empleada una Técnica denominada Web Scraping, el cual se encarga de interpretar el sitio web descargado para separarlo en una estructura estación que contendrá todas las variables disponibles (Nivel de regla).

Los datos de Itaipú Binacional se presentan en formato JSON, por lo que la interpretación basta con una simple lectura y acceso a la estructura. Estas estaciones presentan además de lecturas del nivel de regla, variables de calidad de agua (conductividad, pH, turbidez, oxígeno disuelto y temperatura).

El proyecto GPM proporciona datos de precipitación en archivos con formato HDF5, el cual cuenta con varias capas de información para un tiempo de la serie temporal. Por ello, empleamos librerías de lectura para archivos HDF5 y extraemos el dataset correspondiente a 'Grid/precipitationCal', por poseer datos de puntos con intensidad de lluvia a nivel mundial. La grilla de puntos es rotada y cortada con un re muestreo cúbico a modo de brindar mayor resolución espacial ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$ a $0.022^\circ \times 0.022^\circ$) y por ende contornos suaves entre los pixeles. Finalmente es generada una imagen en formato GeoTIFF.

De manera muy parecida al proyecto GPM, los datos de pronósticos del ECMWF son descargadas en formato grib para luego mejorar su resolución espacial ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ a $0.022^\circ \times 0.022^\circ$) a través de un re muestreo cúbico y convertirlas finalmente al formato GeoTIFF.

2.2.3. Extracción

En el momento de realizar algún análisis sobre el histórico de las imágenes de precipitación captadas e interpretadas, será muy costoso por el gran volumen de información que existe. Por ello, ciertos análisis o consultas deben realizarse a medida que las imágenes son generadas y almacenadas, de manera a aliviar los procesos desarrollados en el aplicativo.

Por día son generadas 48 imágenes del GPM, por mes 1.488 y por año 17.520 aproximadamente. Por ello, la necesidad de ir almacenando datos de análisis previos. En los procedimientos de esta componente fueron elaborados métodos que extraen promedios, mínimos y máximos en relación a una región geográfica (Departamento, Distrito y Cuencas), como también, a cada estación hidrológica del país se le asocia la precipitación ocurrida en base a su posición.

El mismo procedimiento es realizado para las imágenes del ECMWF, en donde tenemos tres pronósticos (precipitación, temperatura y humedad de suelo) a 12 días en intervalos de 6 horas cada

día, generando aproximadamente la misma cantidad de imágenes que el GPM anualmente.

2.2.4. Geoprocesamiento

Esta tarea genera todos los datos del CIH que contemplan el atributo espacial dentro del estudio realizado. Normalmente son obtenidos a través del empleo de sistemas de información geográfica o aplicaciones que soportan datos espaciales.

2.3. Almacenamiento

Una vez procesado los datos geospaciales, hidrológicos, meteorológicos y colaborativos, deben ser almacenados en diferentes tipos de bancos de datos, ya sean motores de bases de datos como también sistemas de archivos, de manera a organizar y categorizar cada información que será involucrada en las funcionalidades de la plataforma.

Toda la información almacenada cuenta con mecanismos adicionales de acceso a los datos, de tal manera que aseguren su integridad, rendimiento e interoperabilidad para la compartición y actualización de los mismos.

La información recolectada es almacenada en un motor de base de datos llamado PostgreSQL, a excepción de las imágenes de precipitación que son almacenados en sistemas de archivos y gestionado por un servidor de mapas llamado Geoserver. Además, el motor de base de datos, cuenta con una extensión llamada Postgis, utilizada para brindar soporte a datos espaciales.

PostgreSQL y Geoserver trabajan conjuntamente a través de una plataforma de información geográfica llamada Geonode, el cual fue personalizado de manera a brindar mayores capacidades de acceso y descarga a todos los datos almacenados, ya sea ficheros o motores de bases de datos. La herramienta facilita gestionar información geográfica con un criterio mínimo de lo que implica una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE).

2.4. Publicación

Está componente constituye la presentación de todo el conjunto de pasos realizados de manera sistemática, en donde, toda funcionalidad desarrollada debe abstraer la complejidad característica de las variables hidrológicas y proveer interpretaciones claras para todo tipo de persona (Técnicos y no técnicos). Para ello, se utilizó el frameworks de desarrollo llamado Django, que permitió la creación de todas las interfaces web junto con sus funcionalidades. Además, se utilizaron de todos los servicios webs ofrecidos por nuestro servidor de mapas Geoserver, el cual optimiza el acceso dinámico de todos los datos espaciales almacenados en el CIH (Raster de precipitación, cartografía, etc.). La sostenibilidad

del sistema es garantizada por el personal del CIH, donde toda la infraestructura montada para el aplicativo es alojada en el Data Center de la Itaipu Binacional.

Se desarrolló un entorno de descarga, donde todos los datos son publicados. Este se encuentra alojado en <http://geohidroinformatica.itaipu.gov.py/yrato/>

3. RESULTADOS

En sus primeras etapas de desarrollo del aplicativo Yrato, se ha podido consolidar la herramienta como un recolector y publicador de datos hidrológicos y meteorológicos con características orientadas a la interpretación sencilla de las distintas variables almacenadas. A continuación se describen características generales con que cuenta el aplicativo:

- **Hidrometría:** (figura 2) Información hidrométrica de distintas fuentes: Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH-ANNP-SEAM), Itaipu Binacional (cuenca de lago Ypacarai), COPEL y ANA del Brasil. A continuación se lista las variables proveídas dependiendo de la estación:
 - Nivel hidrométrico
 - Conductividad, PH, turbidez, oxígeno disuelto y temperatura
- **Precipitación satelital:** (figura 3) acceso al historial completo de imágenes de intensidad de precipitación del Proyecto Global Precipitation Measurement (GPM-NASA) y pronóstico de precipitación, temperatura y humedad de suelo del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), como

también a los cálculos estadísticos generados sistemáticamente por región (Departamento, Distrito y Cuenca).

- **Inundación:** (figura 4) Mapas de afectación son generados por cotas de nivel de agua para algunas estaciones, con estadísticas al vuelo de cantidad de estructuras edilicias afectadas (viviendas, comercios, etc.).
- **Evaluación de datos:** (figura 5) métricas con el fin de evaluar disponibilidad de datos por estación, registro de niveles alertas y lecturas inusuales. Esta evaluación de cantidad y calidad de datos son realizados con métodos estadísticos (histogramas y filtros por cuantiles).
- **Panel de Control:** (figura 6) clasificación de variación de niveles de ríos, alertas de niveles de regla, estaciones no actualizadas y estaciones con lectura inusual del instrumento. Además es posible observar la clasificación regional de intensidad de precipitación como también el total acumulado hasta la fecha y el pronóstico esperado.
- **Administración de datos:** (figura 7) soporte para carga manual de estaciones por parte de usuarios que contengan una identificación y autorización para la misma. La aplicación WEB es capaz de adaptarse al dispositivo (teléfonos celulares, tablets, computadoras, etc.)
- **Servicios:** (figura 8) compartición de datos con otras aplicaciones a través de servicios WEB. Esto brinda interoperabilidad entre diversas aplicaciones que desean utilizar los datos para la construcción de diversas herramientas o estudios.

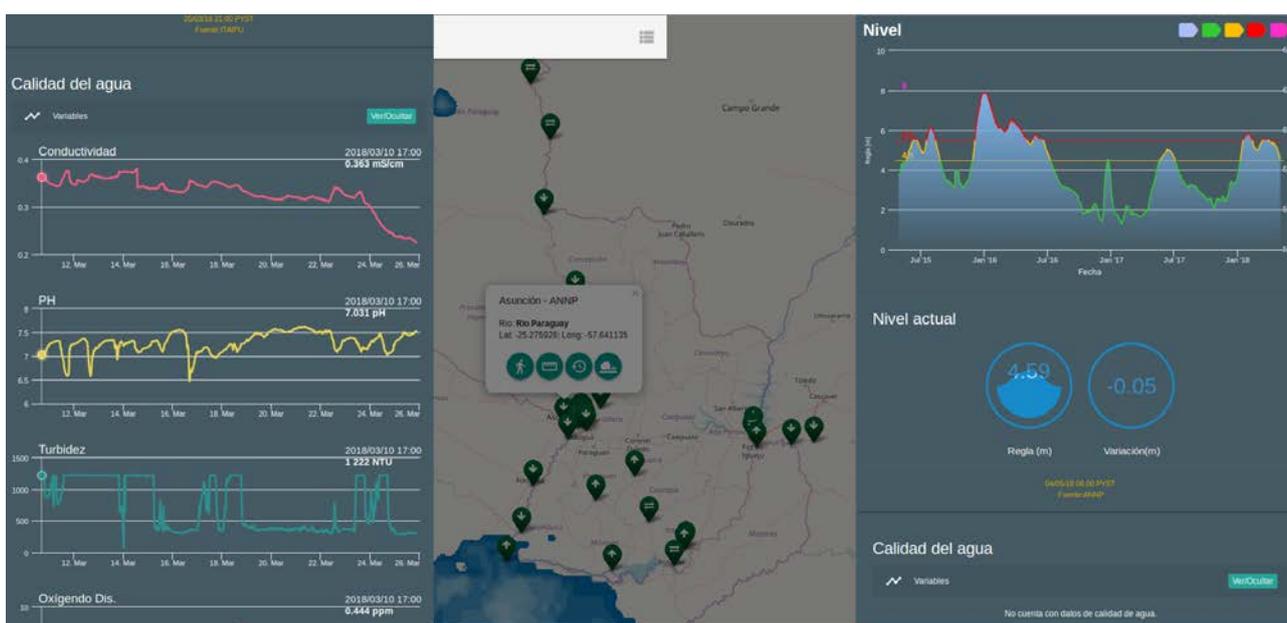


Figura 2. Datos de calidad y cantidad de agua en una estación.

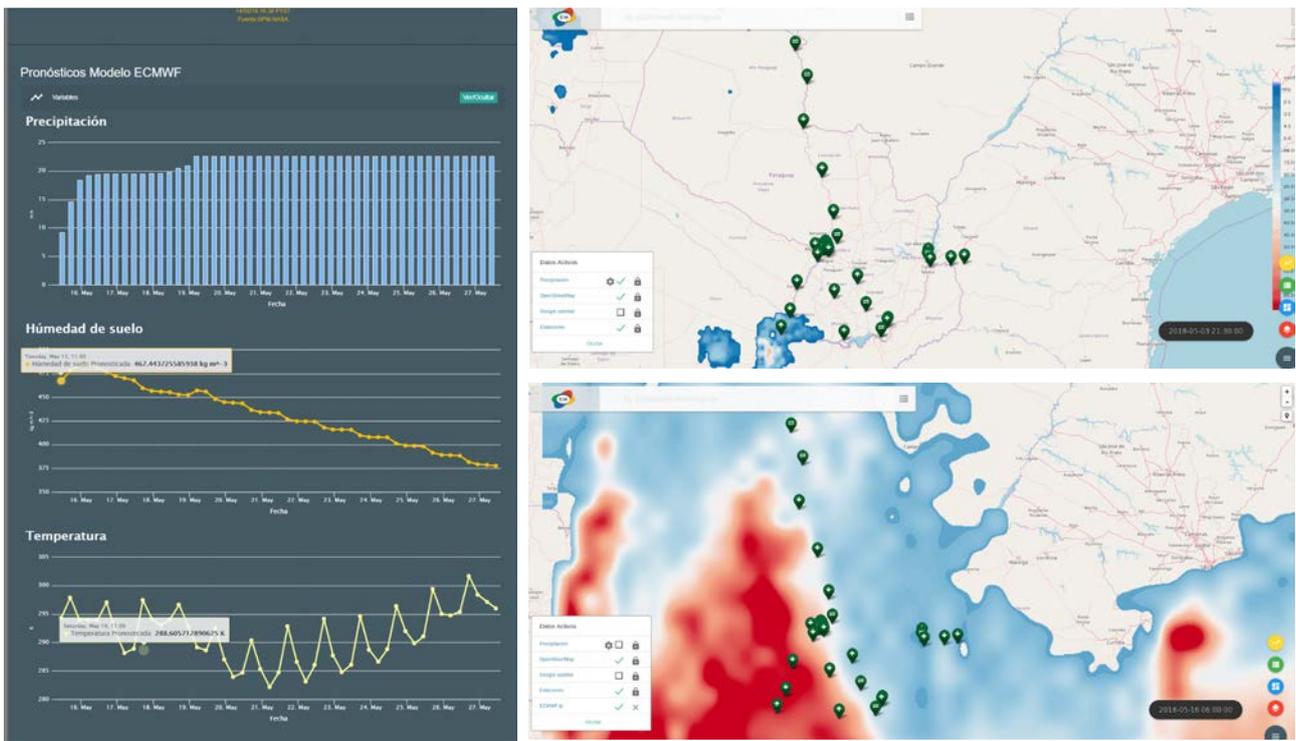


Figura 3. Pronóstico e historial de precipitación.

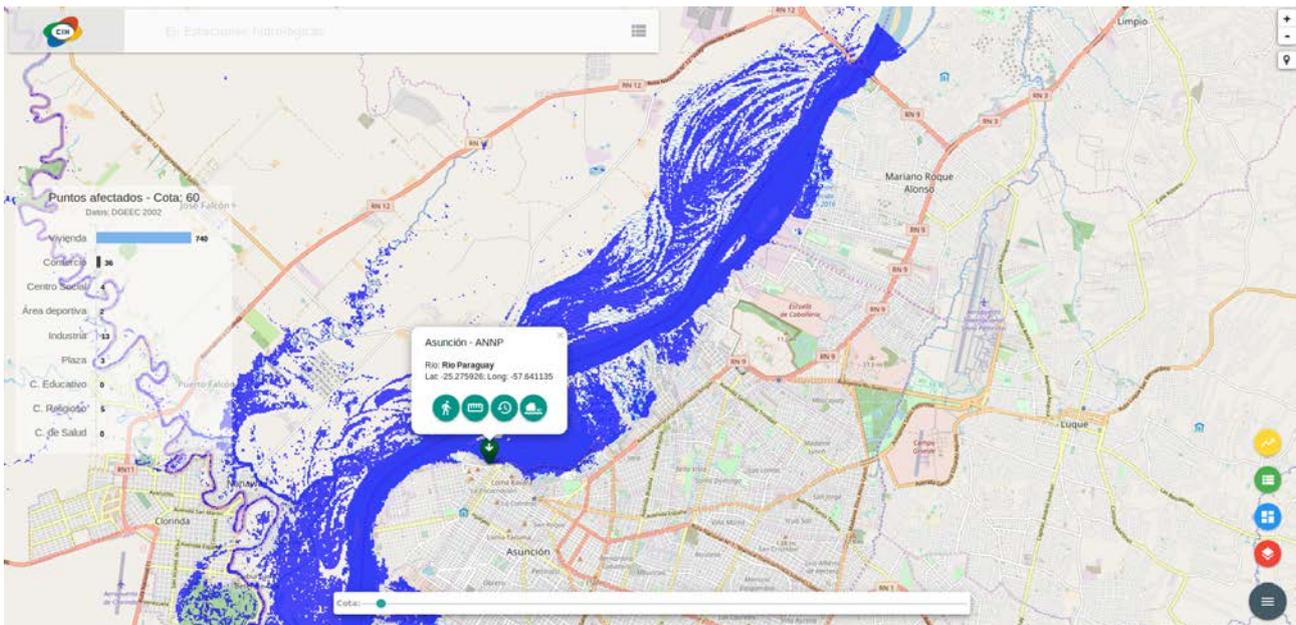


Figura 4. Control de cota para estimación de área inundada y contabilización de afectados.



Figura 5. Evaluación de datos en una estación.



Figura 6. Panel de control de datos de precipitación e hidrológicos.

Centro Internacional de Hidroinformática

> Inicio > Estaciones Hidrológicas > Modificar

San Bernardino Manual

Estación [+](#)

San Bernardino Manual

Código
sbm

Río
Lago Ypacarai

Alerta

Crítico

Desastre

Cota

Cota nivel máximo

Encargado [+](#)
juannunez

Sencalidad

Últimas Lecturas

Nivel	Conductividad	Ph	Turbidez	Od	Tempagua	Fecha			
0,6						13/02/2017	11:00:00	Hey	Dbs
0,58						12/02/2017	14:00:00	Hey	Dbs

Figura 7. Formulario de inserción de lecturas hidrológicas.

Yrato

Documentación acerca de todos los servicio que el aplicativo Yrato disponibiliza para el uso.

services

- </services/precipitacion/<fecha>/<fechasig>/> GET OPTIONS
- </services/precipitaciondepto/<fecha>/<fechasig>/<depto>/> GET OPTIONS
- </services/precipitaciondisto/<fecha>/<fechasig>/<disto>/> GET OPTIONS
- </services/precipitacioncuenca/<fecha>/<fechasig>/<cuenca>/> GET OPTIONS
- </services/precipitacionestacion/<fecha>/<fechasig>/<estacion>/> GET OPTIONS
- </services/hidrometricaestacion/<fecha>/<fechasig>/<estacion>/> GET OPTIONS
- </services/departamentos/> GET OPTIONS
- </services/distritos/> GET OPTIONS
- </services/cuencas/> GET OPTIONS
- </services/estaciones/> GET OPTIONS

CIH Centro Internacional de Hidroinformática

Laboratorio de Hidráulica - Bloque A Av. Tancredo Neves, 473 - CEP 85.856-970
Supercarretera Itaipu km 15 1/2 - Hernandarias - Paraguay Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil
Tel + 595 61 9998247 Tel + 55 45 35767076

© 2017 Centro Internacional de Hidroinformática

Figura 8. Definición de servicios Web publicados.

4. CONCLUSIÓN

A medida que se va desarrollando un sistema de alerta temprana ante inundaciones, se puede observar una gran variedad de soluciones complementarias que benefician a otros tipos de análisis relacionadas a la gestión integral de los recursos hídricos, siendo el monitoreo hidrológico el principal soporte por representar a una unidad generadora de datos de las condiciones.

El uso de tecnologías de la información y comunicación (TIC) articulan los procesos de tal forma que los datos monitoreados lleguen a todos, actuando como una interfaz que recopila y estructura de manera a simplificarlas. Las TIC's nos brindan además agilidad y robustez para la creación de nuevas herramientas que interactúan entre sí, unificando los mecanismos de comunicación.

El uso de las TIC's en el monitoreo hidrológico en esta primera etapa de desarrollo del aplicativo YRATO nos hace pensar no solo que es el mecanismo para la compartición de datos de forma eficiente, sino también, es la forma de hacer llegar la información técnica a la ciudadanía de manera a contribuir en el mejoramiento de su calidad de vida ante los riesgos que pueden generar los recursos hídricos.

Desde el lanzamiento de la primera versión hemos notado que la necesidad de este tipo de herramientas representa un gran obstáculo para la realización de estudios o análisis en la gestión integral de los recursos hídricos, ya que a un profesional fuera del área de TIC's le resulta muy difícil recolectar de manera eficiente y en poco tiempo las variables hidrológicas necesarias para su tarea. Por ello, en esta primera etapa Yrato simplifica esa tarea proveyendo los datos, abstrayéndolos de los procesos costosos para la recolección de materia prima en sus análisis. En adición, en el camino hacia un sistema de alerta temprana ante inundaciones, la herramienta con cada nueva entrada de datos se potencia y nos posibilita innovar en funcionalidades orientadas a la interpretación razonable de la ciudadanía hacia las variables hidrológicas.

Analizando todos estos puntos descritos, podemos concluir que las TIC's haciendo uso de toda su amplitud nos permite innovar en herramientas que construyan un sistema de soporte de decisiones en todos los niveles, autoridades, técnicos hasta ciudadanos mejorando cada día en la gestión riesgos ante inundaciones.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Enrique López Lara, Carlos Posada Simeón & Jesús Gabriel Moreno Navarro, LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, 1997, Jerez de la Frontera, Cádiz, España, 804 p.

Geospatial Data Abstraction Library, OSGeo Project. Holanda, 09/05/2018. <http://gdal.org/>, e-mail: gdal-dev@lists.osgeo.org

Ryan Mitchell, 2015, Web Scraping with Python, O'REILLY Media, Sebastopol, California, USA, 239 p.

Introducing JSON. 09/05/2018. <https://www.json.org/>.

Marcos Palomo Arroyo, 2010, Congreso Nacional del Medio ambiente, Madrid, España. 11 p.

EARTHDATA, EOSDIS, National Aeronautics and Space Administration. USA, 10/05/2018. <https://earthdata.nasa.gov/user-resources/standards-and-references/geotiff>

OpenStreetMap, Fundación OpenStreetMap. Reino Unido, 10/05/2018. <https://www.openstreetmap.org/about>

Geosever, OpenPlans, Open Source Geospatial Foundation. USA, 10/05/2018. <http://geoserver.org/about/>

GeoNode's Documentation, Sphinx, Open Source Geospatial Foundation. USA, 05/10/2018. <http://docs.geonode.org/en/latest/index.html>

OGC, OGC, Open Geospatial Consortium. USA, 10/05/2018. <http://www.opengeospatial.org/>, e-mail: info@opengeospatial.org

Miguel A. Bernabé Poveda & Carlos M. López Vázquez. 2012. Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE). UPM Press, Madrid, España, 42p.

Framework, EcuRed, EcuRed. Cuba, 10/05/2018. <https://www.ecured.cu/Framework>, e-mail: ecured@idict.cu

Django. thespot. Django Software Foundation. USA, 05/10/2018. <https://www.djangoproject.com/>

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Reino Unido, 05/10/2018. <https://www.ecmwf.int>

Global Precipitation Measurement, National Aeronautics and Space Administration. USA, 10/05/2018. <https://pmm.nasa.gov/gpm>

ELABORACIÓN DE UNA DEFINICIÓN PROPIA DE GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

ELABORATION OF AN OWN DEFINITION OF INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN

Doria Franca, Miguel; Lobo Igartua, Constanza¹

Resumen

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) es un concepto flexible que se viene trabajando en mayor o menor grado en los países de América Latina y el Caribe, así como en el mundo, y de maneras muy distintas. La definición de este concepto más aceptada a nivel global es la de la Asociación Mundial para el Agua (GWP por sus siglas en inglés). En la XI Reunión de Comités Nacionales y Puntos Focales del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI LAC) de UNESCO (celebrada en Santiago de Chile, Chile, octubre 2015), los países solicitaron y se comprometieron bajo Resolución PHI/LAC XI-09 a buscar una definición propia que se amoldara a la realidad de la región y su enorme diversidad. Mediante un proceso participativo se definió la GIRH *“un proceso dinámico, con participación social e institucional intersectorial, para el manejo de las aguas y sus interacciones con el entorno, para garantizar su sostenibilidad, minimizar impactos negativos y obtener los máximos beneficios ambientales, socioculturales y económicos. La gestión integrada se basa en una visión holística de los sistemas hídricos (superficiales, subterráneos y otros), tanto a nivel de cantidad como de calidad, considerando su función en los ecosistemas y los usos humanos (a través de sus dimensiones ética, sociocultural, ambiental, económica, y tecnológica entre otras), promoviendo la equidad (incluyendo de género) y la adaptación al cambio global.”*

La búsqueda de una definición propia, es la búsqueda de la apropiación de un concepto a la realidad de cada país, y un intercambio de opiniones y experiencias para llegar a un consenso en la comprensión y desarrollo del concepto a nivel regional. La importancia de este proceso estriba en el debate originado y la apropiación del concepto a una mirada particular de la región que, aunque dinámica y diversa, tiene su propia idiosincrasia.

Palabras clave: Definición de GIRH, PHI LAC, proceso participativo, apropiación de concepto.

Abstract

Integrated Water Resources Management (IWRM) is a flexible concept being developed in a greater or lesser extent in the countries of Latin America and the Caribbean, as well as in the world, and in very different ways. The most accepted definition of this concept is that of the Global Water Partnership (GWP). In the XI Meeting of National Committees and Focal Points of the International Hydrological Program for Latin America and the Caribbean (IHP LAC) of UNESCO (in Santiago de Chile, September 2015), the countries requested and committed themselves under Resolution PHI-LAC / XI-09 to search for a definition of their own that adapts to the reality of the region and its enormous diversity. Through a participatory process, GIRH was define as *“a dynamic process, with social and intersectoral institutional participation, for the management of waters and their interactions with the environment, to guarantee their sustainability, minimize negative impacts and obtain the maximum environmental, sociocultural and economic benefits. Integrated management is based on a holistic vision of water systems (surface, underground and others), both in terms of quantity and quality, considering their role in ecosystems and human uses (through their ethical, socio-cultural, environmental, economic and technological dimensions, among others), promoting equity (including gender) and adaptation to global change.”*

The search for a proper definition is the search for the appropriation of a concept to the reality of each country, and an exchange of opinions and experiences to reach a consensus on the understanding and development of the concept on a regional level. The importance of this process lies in the debate and the appropriation of the concept to a particular view of the region that, although dynamic and diverse, has its own idiosyncrasy.

Keywords: IWRM definition, IHP LAC, participatory process, concept appropriation.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de Gestión Integrada de Recursos Hídricos es un concepto empírico que nace de la práctica y la experiencia de profesionales en este campo, viendo la lógica mejora en la eficiencia,

la construcción de consenso y el manejo de los conflictos, frente a la gestión parcializada de desarrollo de la oferta. La definición más aceptada es la que aprobó la Asociación Mundial para el Agua (GWP por sus siglas en inglés), y que estaba influenciada

1 Programa Hidrológico Internacional de UNESCO, Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe, Montevideo. Uruguay. m.doria@unesco.org; c.lobo@unesco.org; phi.lac@unesco.org

por numerosos debates y consensos anteriores. Actualmente, y como parte de la esencia propia de este concepto que es cambiante y flexible, según las distintas formas de desarrollo de las poblaciones, los Comités Nacionales y Puntos Focales del PHI LAC de UNESCO, reunidos en Bahamas en septiembre de 2017 en la XI Reunión bianual y mediante la Resolución PHI-LAC XI-09, proponen llevar a cabo acciones para la “definición y aplicación de principios de gestión integral del agua” en los países de la región. Surge así la necesidad de desarrollar una definición propia, ajustada a la realidad de los países de la región y que mantenga vivo el debate y los caminos de lo que supone la GIRH.

Como parte de este proceso y previo al proceso de consulta, se realizó un Seminario de Alto Nivel sobre la implementación de la GIRH en distintos países, en el marco de la XIX Reunión de la red CODIA (Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua). El Seminario contó con presentaciones de España, El Salvador y Uruguay, e intervenciones de Costa Rica y República Dominicana. Estos ejemplos sirvieron para conceptualizar la práctica de la GIRH en diferentes países e introducir el debate de lo que se entiende en la región por este concepto.

2. ANTECEDENTES

En 1977 las Naciones Unidas llevaron a cabo en la ciudad de Mar del Plata, Argentina, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua, la primera reunión intergubernamental exclusivamente dedicada al agua. En ella se da la aprobación de un detallado documento que reunía las conclusiones y recomendaciones de los mandatarios, el Plan de Acción de Mar del Plata, un importante hito en la alineación de políticas de gestión del agua a nivel intergubernamental, si bien hubo escaso seguimiento y compromiso posterior. En esta Conferencia se contemplaba ya una visión de conjunto en el manejo de los recursos hídricos, abarcando desde un enfoque integrador muchos de los debates que en los tiempos anteriores habían ido surgiendo en las interacciones agua-sociedad-ambiente desde una diversidad de campos disciplinarios.

En 1990, finalizado el Decenio Internacional del Agua Potable y el Saneamiento Ambiental, se celebra en Delhi la consulta mundial sobre el agua y el saneamiento cuyo resultado fueron 4 principios rectores en torno a agua y salud, personas e instituciones, gestión por la comunidad, y finanzas y tecnología. Los dos primeros principios hacen alusión a la necesidad de promover la gestión integrada de los recursos hídricos y de los desechos líquidos y sólidos para la sostenibilidad ambiental y una mejor salud humana. El texto incluye un llamamiento a realizar las reformas institucionales necesarias para promover el enfoque integrado, incluyendo procedimientos, comportamientos y actitudes, con plena participación de la mujer.

Poco después, en la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente (1992) se logra la Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible, que recomienda la adopción de una gestión integrada del agua que reconozca el valor de esta en todos sus usos, e introduce el principio de una tarificación del agua. Esta Conferencia sirvió como reunión técnica previo a la segunda Cumbre de la Tierra (Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Río 1992), donde se formulan recomendaciones de medidas a nivel local, regional y global bajo los siguientes principios:

- Principio Nº 1 – El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente
- Principio Nº 2 – El aprovechamiento y la gestión del agua debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles.
- Principio Nº 3 – La mujer desempeña un papel fundamental en el abastecimiento, la gestión y la protección del agua.
- Principio Nº 4 – El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico.

Algunos de estos principios aparecerían en la concepción de GIRH que daría la GWP unos años después, y que actualmente es la de mayor aceptación a nivel global: el desarrollo sostenible, la participación social, la equidad de género, y el agua como recurso, es decir, como bien económico. La GWP se fundó en 1996 con el apoyo del Banco Mundial, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (ASDI), basada en los principios y recomendaciones de las anteriores conferencias internacionales. La red de GWP tiene más de 2.000 organizaciones miembros en 70 países en 13 regiones.

Según define el Comité Técnico de GWP, “la GIRH es un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.”

En la tercera Cumbre de la Tierra (CNUMAD, Johannesburgo 2002), representantes de 113 Estados miembros de las Naciones Unidas acuerdan el Plan de Implementación de Johannesburgo donde se establece como uno de los objetivos el desarrollo de la gestión integrada de recursos hídricos y de planes de eficiencia para 2005, mediante acciones a todos los niveles y con apoyo a los países empobrecidos.

Dado que la GIRH es un proceso continuo, su aplicación se da en mayor o menor medida en los diferentes países. Su grado de aplicación, sin

embargo, toma auge en esta época con mayor compromiso institucional para su desarrollo y para desarrollo de los propios países a través de este medio.

En 2015, finalizado el período de implementación de los 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) que adoptaron 189 países miembros de las Naciones Unidas para afrontar los grandes problemas de la humanidad, 193 países miembros se comprometieron nuevamente en la adopción de la Agenda2030 con 17 nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y sus 169 metas. Con mayor ambición que los anteriores objetivos y una mayor participación de los países en su elaboración y negociación, los ODS resultan mucho más específicos en sus áreas de actuación y contemplan de manera transversal la necesaria sostenibilidad para un verdadero desarrollo. En la región LAC se hace especialmente importante la lucha contra la desigualdad como desafío para la consecución de todos los objetivos.

El agua y el saneamiento son esenciales para la vida y están directamente relacionados con la salud, los sistemas productivos agrícolas y ganaderos, la producción industrial y de energía, los desechos y residuos, la contaminación, los efectos del cambio climático y la sostenibilidad de los ecosistemas, entre otras cuestiones. Por ello, en mayor o menor medida, todos los ODS están relacionados con la gestión del agua, como el Objetivo 2 por la seguridad alimentaria, el 11 por la sostenibilidad en los asentamientos humanos, el 13 por el cambio climático, o el 15 por el uso sostenible de ecosistemas y la gestión de la desertificación. A diferencia de los ODM, en cambio, hay un objetivo específico para “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todas las personas”, lo que supuso un cambio radical en el enfoque del agua en la agenda internacional. Una buena gestión del agua puede ser decisiva en la aplicación de soluciones integradas que abarquen distintos sectores. Por ello, en el ODS 6, el indicador mundial 6.5.1. hace alusión expresa al grado de implementación de la GIRH sobre agua y saneamiento, midiendo el “grado de aplicación de la ordenación integrada de los recursos hídricos (0 - 100)”. Más aún, dado este interrelacionamiento, la gestión integrada puede ser decisiva en la consecución de otras metas del ODS 6 así como de otros ODS.

Actualmente los países de la región LAC, como en general en el mundo, se encuentran a la búsqueda de maneras de implementar la Agenda2030 para la consecución de los objetivos y el cumplimiento de los acuerdos internacionales. En el seno de las discusiones intergubernamentales en torno al agua, surge la necesidad de desarrollar una definición propia, que de algún modo fomente la apropiación del concepto de GIRH a las estructuras institucionales de los países. Es decir, el desarrollo de una definición surge como una oportunidad para poner en debate este concepto y hacerlo propio para la región.

3. METODOLOGÍA

Para construir una definición propia de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, se consultó a los países de Latinoamérica y Caribe a través de una encuesta enviada a los Comités Nacionales y Puntos Focales del PHI, generalmente las máximas autoridades de agua en los gobiernos. El formato de la encuesta fue inspirado en la metodología Delphi, similar a la aplicada en Doria, M. et al. (2009) *Using expert elicitation to define successful adaptation to climate change*. Este tipo de encuesta se basa en una consulta a personas expertas y profesionales de alto nivel del sector mediante un proceso interactivo, en el que las respuestas son compartidas en un segundo cuestionario. Este proceso puede repetirse de forma iterativa hasta conseguir cierto grado de consenso entre participantes, o cuando se alcanza un nivel exhausto en que no tienen más que añadir. En el caso de una definición consensuada de la GIRH en la región, se partió de una propuesta de definición que fue modificada a través de los comentarios de las personas expertas que participaron del proceso.

Para ello, se comenzó compartiendo la definición de GIRH que queda establecida en el Plan Estratégico del PHI de UNESCO que actualmente se encuentra en su octava fase (2014-2021), por la “Seguridad Hídrica: respuestas a los desafíos locales, regionales y mundiales”.

Definición GIRH: Proceso que promueve el manejo integrado de los recursos hídricos para obtener el máximo de resultados económicos y seguridad social de forma equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas.

Texto extraído del Plan Estratégico PHI-VIII (2014-2021): “La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) es un proceso que promueve el manejo integrado de los recursos hídricos para obtener el máximo de resultados económicos y seguridad social de forma equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas. La GIRH incorpora todas las partes del ciclo hidrológico y las reconoce como sistemas integrados, al mismo tiempo que considera la demanda de agua para consumo residencial, industrial, agrícola y ecológico. La GIRH reconoce e incorpora las interacciones entre el sistema y los ecosistemas. La GIRH ofrece considerables beneficios como un método para aplicar la adaptación al cambio global. El enfoque de la GIRH emerge y se basa en la experiencia de los resultados poco óptimos alcanzados por los enfoques tradicionales. Por ejemplo, en áreas urbanas, en contraste con los enfoques convencionales, la GIRH adopta una perspectiva integral hacia los servicios hidrológicos urbanos, contemplando el abasto de agua, el agua de lluvia y las aguas residuales como componentes de un sistema de infraestructura integrado. Además, la GIRH reconoce que el sistema físico descansa en un marco organizacional, de forma que, al emplear prácticas de GIRH se puede alcanzar una optimización general del sistema.”

El cuestionario cuenta con una descripción del proceso iterativo a través del que se realizará la definición consensuada, un apartado de inscripción y una única pregunta “A partir de esta definición, proponga cuantos cambios sean necesarios para que la definición se adecúe lo máximo posible a su concepción de la GIRH”. Se utilizó la plataforma online Survey Monkey, aprobada por la UNESCO por la confiabilidad en la protección de datos, dando 15 días para envío de respuestas en cada consulta, después de los cuales las respuestas fueron extraídas y archivadas.

Previo al proceso de consulta, se realizó un Seminario de Alto Nivel sobre la implementación de la GIRH en distintos países, en el marco de la XIX Reunión de la red CODIA (Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua). El Seminario contó con presentaciones de España, El Salvador y Uruguay, e intervenciones en debate de Costa Rica y República Dominicana. España compartió su recorrido desde los logros a las dificultades en los marcos legal, institucional y financiero, los aprendizajes en el ámbito territorial y a escala de cuenca, y la visión que se plantea en un horizonte temporal de largo plazo. El Salvador compartió los largos años de proceso hacia la planificación hídrica que se han ido dando en el marco de la elaboración de una Ley General de Aguas modificada consecutivamente en las distintas legislaturas y que no acaba de encontrar consenso para su aprobación. El caso de Uruguay, con la aprobación reciente de su Plan Nacional de Aguas, destacó la necesidad de incluir la participación social en la elaboración del Plan y el costo personal de todas las personas implicadas por llegar a consenso. Costa Rica también destacó la necesidad de la participación para la elaboración de su Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos, y las

dificultades en hacer que las instituciones operen bajo el mismo. República Dominicana por su parte, compartió la necesidad de regular a los diferentes actores que actualmente son responsables del agua, siendo el Instituto Nacional Dominicano de Recursos Hídricos (INDRHI) la institución rectora, pero que su vez se debe coordinar con una multitud de instituciones sectoriales especializadas del Estado. Actualmente, el Gobierno de la República Dominicana se encuentra en proceso de diseño y desarrollo de un nuevo marco legal e institucional que favorezca la integración en el manejo de los recursos hídricos.

Este Seminario permitió debatir sobre los principios en los que se basa la GIRH con ejemplos detallados y concretos de su aplicación en los países de la región mencionados, suponiendo un importante trabajo de reflexión previo a la elaboración de una definición consensuada de la misma.

4. RESULTADOS

El acceso a la encuesta fue enviado a representantes de 36 países de la región. En la primera consulta, se obtuvieron 11 respuestas de 10 países diferentes. Los cambios propuestos a la definición fueron integrados en una segunda definición y emitidos de nuevo a las autoridades para nueva consulta. En la segunda consulta se recibieron 12 respuestas de 7 países diferentes. En la tercera y última se recibieron 3 respuestas de 3 países con propuestas de cambio menores, tras lo cual se dio por consensuada la definición que se compartió a los 36 países consultados.

En total respondieron 12 países diferentes, según se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Países que participaron en cada consulta.

Primera consulta	Segunda consulta	Tercera consulta
Trinidad y Tobago	Trinidad y Tobago	Trinidad y Tobago
Mexico	Mexico	Mexico
Costa Rica	Costa Rica	Costa Rica
Uruguay	Uruguay	
Perú	Perú	
Panamá	Panamá	
Paraguay	Paraguay	
Bahamas		
Colombia		
Cuba		
	Brasil	
	El Salvador	

La definición pasó así por tres iteraciones variando como sigue a continuación.

Versión de partida: Proceso que promueve el manejo integrado de los recursos hídricos para obtener el máximo de resultados económicos y seguridad social de forma equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas.

Versión 1: La GIRH es un proceso que promueve el manejo integrado de los sistemas hídricos (aguas superficiales y subterráneas, y sus interacciones con los sedimentos), como parte de los ecosistemas para garantizar su sostenibilidad, minimizar impactos negativos y obtener el máximo beneficio ambiental, sociocultural y económico. La gestión integrada implica una visión holística de los sistemas hídricos, tanto a nivel de cantidad como de calidad, considerando de forma prospectiva su función en los ecosistemas y los usos humanos (a través de sus dimensiones ética, sociocultural, ambiental y económica). El proceso promueve la adaptación al cambio global y la equidad (incluyendo de género). Debe ser dinámico, con revisiones periódicas y con participación social e institucional, empleando prácticas que puedan alcanzar una optimización general del sistema.

Versión 2: La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso dinámico, con participación social e institucional intersectorial, que consiste en el manejo de las aguas y sus interacciones con el entorno, con el fin de garantizar su sostenibilidad, minimizar impactos negativos y obtener los máximos beneficios ambientales, socioculturales y económicos. La gestión integrada se basa en una visión holística de los sistemas hídricos (superficiales, subterráneos y otros), tanto a nivel de cantidad como de calidad, considerando su función en los ecosistemas y los usos humanos (a través de sus dimensiones ética, sociocultural, ambiental y económica), promoviendo la equidad (incluyendo de género) y la adaptación al cambio global.

Definición (versión final):

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso dinámico, con participación social e institucional intersectorial, para el manejo de las aguas y sus interacciones con el entorno, para garantizar su sostenibilidad, minimizar impactos negativos y obtener los máximos beneficios ambientales, socioculturales y económicos. La gestión integrada se basa en una visión holística de los sistemas hídricos (superficiales, subterráneos y otros), tanto a nivel de cantidad como de calidad, considerando su función en los ecosistemas y los usos humanos (a través de sus dimensiones ética, sociocultural, ambiental, económica, y tecnológica entre otras), promoviendo la equidad (incluyendo de género) y la adaptación al cambio global.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La definición original extraída del Plan Estratégico PHI-VIII, consiste en una sencilla frase donde lo definido entra en la definición, y que hace alusión al objetivo de la GIRH y no tanto a en qué consiste el proceso, si bien el texto más amplio del cual se extrae esta definición sí contempla una visión más amplia del concepto de GIRH.

Por otro lado, la definición más aceptada a nivel mundial de la GIRH es la dada por la GWP, que define el proceso en el que consiste este concepto. Sin embargo, siendo que la GIRH es un concepto cambiante, pues así es la naturaleza de la gestión, y que puede llevarse a cabo en mayor o menor grado y de muy diferentes maneras según el contexto local, regional, nacional e internacional en que se aplica, desde el seno de las autoridades de agua de los países LAC se quiso poner en cuestión la definición con el fin de lograr una propia. Más importante que una definición estática, concreta y definitiva, es el proceso de debate que lleva a cuestionar este concepto, renovarlo y enfocarlo desde las múltiples visiones de cada país que participó. La realización de una definición propia para LAC, tiene por tanto un carácter de cuestionamiento y debate interno.

Resalta la dificultad de combinar los comentarios de las personas participantes de forma objetiva, siendo que algunos no eran compatibles con otros. Se optó por incorporar los comentarios de carácter más amplio sobre los más detallados. En este sentido, se observaron diferencias entre quienes optaron por comentarios que detallaban más la definición, y aquellos que proponían menor detalle para favorecer la amplitud del concepto. Podría decirse que parte del debate en la incorporación de comentarios estribó en que cuanto más detallada es la definición, más se limita el concepto, pero cuanto menos se detalla más ambigua o proclive a interpretaciones queda.

En aras de llegar a un consenso entre la limitación del concepto o la ambigüedad del mismo, se optó por la inclusión de aquellos detalles que fueron sugeridos por varias personas, o por aquellos que presentaban amplitud suficiente, y finalmente por incorporar la amplitud a través de expresiones como "y otras" tras la definición de adjetivos a alguno de los núcleos conceptuales que formaban parte de la definición. A modo de ejemplo, se debatió sobre el concepto de ecosistemas y su interacción con la visión holística que se proponían para formar parte de la definición, en cuanto a que, en una visión holística de los ecosistemas desde el punto de vista de la ecología, tanto los recursos acuáticos como la sociedad y sus necesidades económicas, quedarían subordinadas a los mismos. Igualmente, sucedería con los pilares de la sostenibilidad, donde la economía sería una herramienta que favorece el desarrollo social siendo la sociedad parte del medio ambiente. Es decir, hubo diferencias en las visiones sobre la jerarquización de los conceptos que forman parte de la GIRH.

Otros cuestionamientos relacionados estribaron en torno a la visión que comprendía una gama desde la ecología a la visión productivista, entendiéndose la naturaleza como un todo o como recursos explotables de los que sacar beneficios capitalizables. En este sentido, y por propia naturaleza de un proceso de consenso, se optó por términos intermedios que sugirieran una visión no excluyente y no posicionada en ninguno de los polos opuestos.

Finalmente, se cerró la encuesta en su tercera ronda, cuando se encontró que varias de las respuestas no añadían nada más a la definición y se incorporaron los últimos dos comentarios puntuales a la versión anterior, dándose por concluido el proceso iterativo.

6. CONCLUSIONES

La propuesta de llevar a cabo una elaboración propia de definición de la GIRH por representantes de los países de la región LAC según expresado en la Resolución PHI-LAC / XII-09, ha demostrado más allá de la importancia de contar con una definición propia, la importancia de la apropiación de un concepto. Dicho de otro modo, el proceso ha develado la importancia de hacer propia la forma de comprender la GIRH en cada país desde el debate de sus experiencias y hacia la búsqueda de lo que sería una gestión ideal. Este proceso imaginativo, interactivo y de consenso en la región, tiene valor por sí mismo, más allá de la versión final de definición elaborada.

No obstante, debe continuar habiendo flexibilidad en la interpretación y aplicación del concepto según connotaciones geográficas, hidrológicas y de diversidad cultural, así como según el contexto temporal en que se requiera.

La contribución más importante de este proceso, es por tanto el aporte a la alineación de formas de conceptualizar la GIRH y de generar políticas para ello, así como el continuo fomento de una cultura de intercambio de experiencias, diálogo y consenso.

Con respecto a la definición de GIRH que venía citándose de GWP, esta nueva definición es más detallada, da cuenta de la diversidad de la región y, sobre todo, enfoca la GIRH desde la idiosincrasia particular de la región de América Latina y el Caribe.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Integrated Water Resources Management in Action. WWAP, DHI Water Policy, PNUMA-DHI Centro para el Agua y el Medio Ambiente, 2009; disponible en: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml>

GWP, 2008. Principios de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos. Bases para el Desarrollo de Planes Nacionales.

Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/sobregirh/2008-principios-de-girh-base-para-el-desarrollo-de-planes-nacionales.pdf

Del Castillo, Lilian, 2009. Los Foros del Agua. Del Mar del Plata a Estambul 1977-2009. Consejo Argentino para las Relaciones Internacionales. Documentos de Trabajo N°86.

Disponible en: <http://www.cari.org.ar/pdf/forosdelagua.pdf>

UNESCO-Programa Hidrológico Internacional (PHI), Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), Red de Organizaciones de Cuenca de Asia (NARBO). 2009. IWRM Guidelines at River Basin Level - Part I: Principles.

Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001864/186417e.pdf>

UNESCO-Programa Hidrológico Internacional (PHI), Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), Red de Organizaciones de Cuenca de Asia (NARBO). 2009. IWRM Guidelines at River Basin Level - Part 2-I: The Guidelines for IWRM Coordination.

Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001864/186418e.pdf>

UN WATER, 2017. Guía para el monitoreo integrado del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 sobre agua y saneamiento. Metas e indicadores mundiales. Versión 14 de julio de 2017; disponible en: http://www.unwater.org/app/.../G2_Metas-e-indicadores-mundiales_Version-2017-07-14.pdf

8. AGRADECIMIENTOS

Desde el PHI LAC, agradecemos a los participantes que han participado en las encuestas emitidas, cuyas contribuciones forman una definición de la GIRH propia para la región, como fue solicitado por las autoridades en la XI Reunión de Comités Nacionales y Puntos Focales.

Los autores agradecen a Soledad Benítez, Sofía Aresqueta, Joaquín Jaffi y Juan Bautista Correa, miembros del equipo del PHI LAC, por sus aportaciones.

9. DISCLAIMER

Este artículo ha sido elaborado por integrantes de la Programa Hidrológico Internacional en LAC, Oficina de Montevideo. Las opiniones y puntos de vista que expresamos son solamente nuestros, y no tienen por qué coincidir con la política, las ideas, intenciones, planes, estrategias, ni postura oficial de ningún organismo, empresa, compañía, organización, servicio, o persona, incluidas las personas que participaron en la encuesta. Este documento fue elaborado en base a los aportes recibidos

de las instituciones enunciadas. No representa necesariamente una posición de la UNESCO y no compromete a la Organización de ninguna manera". La definición final elaborada a partir de los comentarios recibidos por las personas participantes de la encuesta no ha sido aún ratificada

por los propios países que solicitaron la realización de esta definición según Resolución PHI-LAC / XII-09, reunidos en Santiago de Chile en la XI Reunión de Comités Nacionales y Puntos Focales del Programa Hidrológico Internacional de UNESCO para América Latina y el Caribe (septiembre, 2015)

Agradecemos en este número, la colaboración de los siguientes revisores:

Balocchi, Francisco

Universidad de Chile, Chile

Centeno, Juan Carlos

Comisión Nacional del Agua, México

Chreties, Christian

Universidad de la República, Uruguay

Emmanuel, Evens

Universidad de Quisqueya, Haití

Gil, Joram

Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de los Recursos Hídricos,
Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Gutiérrez, Alfonso

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Laiz, Orlando

Empresa de investigaciones y Proyectos Hidráulicos, Cuba

Logan, William

International Center for Integrated Water Resource Management (ICIWaRM), United States

Martínez, Polioptro

Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos, Universidad de las Américas Puebla, México

Mazzeo, Nestor

Universidad de la República, Uruguay

Mejía Zermeño, Roberto

Pérez, Fidel

Universidad Brigham Young, Estados Unidos

Pizarro, Roberto

Universidad de Talca, Chile

Planos, Eduardo

Instituto de Meteorología, Cuba

Pochat, Víctor

Consultor en Planeamiento y Gestión de los Recursos Hídricos, Argentina

Sapriza, Gonzalo

Universidad de la República, Uruguay

Spalletti, Pablo

Instituto Nacional del Agua, Argentina

Val, Rafael

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México

UNESCO

Programa Hidrológico Internacional
Oficina Regional de Ciencia
para América Latina y el Caribe

International Hydrological Programme
Regional Office for Science
for Latin America and the Caribbean

Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: (598-2) 413 20 75, Fax: (598-2) 413 20 94
aqualac@unesco.org
www.unesco.org.uy/phi/aqualac

ISSN: 1688-2873

