



ISSN 2007-2422

Tecnología y Ciencias de Agua



Inundaciones 2022, Guadalajara, Jalisco, México. Foto Fabricio Attilano Ochoa.

Portada: inundación en Guadalajara, Jalisco, México. Las inundaciones son eventos que se pueden definir como un fenómeno de origen natural o antrópico, en el cual la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos y mares, generando el anegamiento temporal de zonas que usualmente no lo están. La importancia de los eventos de inundación se amplifica cuando las zonas anegadas son centros urbanos densamente poblados donde puede cobrarse la vida de personas.

Ver el artículo “Análisis geoespacial de los sitios de afectación por inundación desde una base de datos recopilada por el cuerpo de bomberos de Guadalajara durante el temporal de lluvia del periodo 2010-2022 / Geospatial analysis of flood impact sites from a database compiled by the Guadalajara fire department during the rainy season of the 2010-2022 period” de Maura González, Boris Comi y Jesús López De la Cruz.

Foto: Fabricio Atilano Ochoa, fotógrafo de la Coordinación Municipal de Protección Civil y Bomberos Guadalajara, Jalisco, México.





Tecnología y Ciencias del Agua

Comité Editorial

Consejo Editorial

Dra. Patricia G. Herrera Ascencio
Directora General
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editor en Jefe
Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez
Consultor Independiente, México

Editor en Agua y Energía
Dr. Rodolfo Alvarado Montero
Consultor independiente, Holanda

Editora en Calidad del Agua
Dra. Maricarmen Espinosa Bouchot
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editor en Tratamiento del Agua
Dr. Miguel Ángel López Zavala
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México

Editor en Ciencias Hidroagrícolas
Dr. Jaime Garatuza Payán
Instituto Tecnológico de Sonora, México

Editora en Ciencias Sociales
Dra. María Luisa Torregrasa y Armentia
FLACSO, México

Editor en Gestión del Agua
Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México

Editor en Hidráulica
Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares
Consultor independiente, México

Editora en Hidrología Subterránea
Dra. Graciela Herrera Zamarrón
Universidad Nacional Autónoma de México

Editor en Hidrología Superficial
Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López
Universidad Autónoma del Estado de Querétaro, México

Editor en Innovación Científica y Tecnológica
Dr. Salvador Peña Haro
Photrack AG, Suiza

Coordinadora editorial
M.I.D. Helena Rivas López
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación Editorial
Seguimiento del proceso de arbitraje: Elizabeth Peña Montiel y Luis Aviles Rios
Marcación y XML: Luisa Guadalupe Ramírez Martínez
Webmaster: Claudia Patricia Martínez Salgado
Apoyo administrativo: Josefa Figueroa Miranda

• **Dr. Alcides Juan León Méndez**, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba • **Dr. Alejandro López Alvarado**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile • **Dra. Alma Chávez Mejía**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Andrei S. Jouravlev**, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile • **Dr. Andrés Rodríguez**, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina • **Dra. Anne Margrethe Hansen Hansen**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Ariosto Aguilar Chávez**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Armando Guevara Gil**, Pontificia Universidad Católica, Perú • **Dr. Arturo Marciano**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Venezuela • **Dra. Aziza Akhouch**, Organisation for economic Cooperation and Development, Francia • **Dr. Carlos Chairez Araiza**, consultor, México • **Dr. Carlos Cruickshank Villanueva**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Carlos Díaz Delgado**, Universidad Autónoma del Estado de México • **Dr. Carlos E. Puente**, University of California, EUA • **Dr. Cleverson Vitório Andreoli**, Centro Universitario Unifae, Brasil • **Dr. Daene C. McKinney**, University of Texas at Austin, Estados Unidos • **Dr. Daniel Murillo Licea**, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México • **Dr. Eduardo A. Varas Castellón**, Pontificia Universidad Católica, Chile • **Dr. Emmanuel Galindo Escamilla**, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México • **Dr. Enrique Cabrera Marcet**, Universidad Politécnica de Valencia, España • **Dr. Enrique Playán Jubillar**, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España • **Dr. Eric Rendón Schneir**, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú • **Dr. Erick R. Bandala**, Desert Research Institute, Reno, EUA • **Dr. Ernesto José González Rivas**, Universidad Central de Venezuela • **Dr. Federico Estrada**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Dr. Gerardo Buelna**, Centre de Reserche Industrielle Québec, Canadá • **Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez**, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México • **Dr. Gueorguiev Tzatchkov Velitchko**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **M.I. Horacio Rubio Gutiérrez**, Comisión Nacional del Agua, México • **Dr. Ismael Aguilar Barajas**, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México • **Dr. Ismael Mariño Tapia**, Instituto Politécnico Nacional, México • **Dr. Ismael Piedra Cueva**, Universidad de la República, Uruguay • **Dr. Iván Obando Camino**, Universidad de Talca, Chile • **Dr. Jaime Iván Ordóñez Ordóñez**, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia • **Dr. Joaquín Rodríguez Chaparro**, Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, España • **Dr. José Ángel Raynal Villaseñor**, Universidad de las Américas, Puebla, México • **Dr. José D. Salas**, University of Colorado, EUA • **Dr. José Joel Carrillo Rivera**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. José Luis Pimentel Equihua**, Colegio de Postgraduados, México • **José María Gómez Espín**, Universidad de Murcia, España • **M.C. Juan Andrés Martínez Álvarez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Juan B. Valdes**, The University of Arizona, EUA • **Dr. Juan Pedro Martín Vide**, Universidad Politécnica de Cataluña, España • **Dr. Julio Kuroiwa Zevallos**, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú • **Dr. Karim Acuña Askar**, Universidad Autónoma de Nuevo León, México • **Dra. Luciana Coutinho**, Universidad de Do Minho, Portugal • **Dr. Luis F. León Vizcaino**, Waterloo, University, Canadá • **Dr. Luis Teixeira**, Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay • **Dra. Luisa Paré Ouellet**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Manuel Contijoch Escontria**, consultor • **Dr. Marcos von Sperling**, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil • **Dra. María Claudia Campos Pinilla**, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia • **Dra. María Rafaela De Saldanha Matos**, Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Portugal • **Dra. María Teresa Oré**, Pontificia Universidad Católica del Perú • **Dra. María Victoria Vélez Otálvaro**, Universidad Nacional de Colombia • **M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos**, consultora, México • **Dr. Michel M. Rosengaus Moshinsky**, consultor, México • **Dr. Miguel A. Medina**, Duke University, EUA • **Dr. Moisés Berezowsky Verduzco**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Omar A. Miranda**, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina • **Dr. Oscar L. Palacios Vélez**, Colegio de Postgraduados • **Dra. Natalia Uribe Pando**, Water Lex, Suiza • **Dr. Óscar F. Ibáñez Hernández**, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México • **Dr. Paulo Salles Alfonso de Almeida**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Rafael Val Segura**, Sistema de Aguas de la Ciudad de México • **Dr. Rafael Pardo Gómez**, Instituto Superior Politécnico • **Dr. Ramón Domínguez Mora**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Ramón Fuentes Aguilar**, Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Chile • **Dr. Ramón Ma. Gutiérrez Serret**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Ing. Raquel Duque**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Colombia • **Dr. Raúl Antonio Lopardo**, Instituto Nacional del Agua, Argentina • **Dr. Rodolfo Silva Casarín**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Serge Léonard Tamari Wagner**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Simón González Martínez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Tomás Martínez Saldaña**, Colegio de Postgraduados, México • **Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka**, consultor • **Dra. Ximena Vargas Mesa**, Universidad de Chile •



Contenido
Artículos (originales)
Articles (original)

Análisis táctico integrado de la problemática de los comités de agua potable de Toluca
Edgar Anzurez-Valencia
Alejandro Tonatiah Romero-Contreras
Carlos Díaz-Delgado

Modelación numérica del flujo rasante en un canal escalonado con curvas verticales
Daniel López-de-Mesa
Andrés Felipe Cuervo
Alejandra Balaguera

Estimation of the willingness to pay in two aquifers in Baja California, Mexico
Lázaro S. Elizondo
Alonso Aguilar-Ibarra
Robert H. Manson
Leopoldo G. Mendoza-Espinosa

Aplicación del algoritmo multiobjetivo NSGA-II en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. Caso: ciudad de Huancavelica, Perú
Tony Tunque-Dueñas
Franzua Ricra-Dueñas
Iván Ayala
Eliana Contreras-Lopez
Marcelo Portuguese-Maurtua

Diagnóstico ágil para determinar la concordancia entre una tecnología de reciclado de aguas grises, y las necesidades específicas de clientes y usuarios potenciales
José Fernando Guillén
Elvia Breña
Edith Juárez

Análisis geoespacial de los sitios de afectación por inundación desde una base de datos recopilada por el cuerpo de bomberos de Guadalajara durante el temporal de lluvia del periodo 2010-2022
Maura González
Boris Comi
Jesús López De la Cruz



Contents
Artículos (traducción)
Articles (translation)

Integrated tactical analysis of the problems of the drinking water supply committees of Toluca 01
Edgar Anzurez-Valencia
Alejandro Tonatiah Romero-Contreras
Carlos Díaz-Delgado

Numerical modeling of skimming flow in a stepped channel with vertical curves 69
Daniel López-de-Mesa
Andrés Felipe Cuervo
Alejandra Balaguera

Estimación de la disponibilidad a pagar en dos acuíferos en Baja California, México 132
Lázaro S. Elizondo
Alonso Aguilar-Ibarra
Robert H. Manson
Leopoldo G. Mendoza-Espinosa

Application of the NSGA-II multi-objective algorithm in the optimal design of drinking water distribution networks. Case: Huancavelica City, Peru 168
Tony Tunque-Dueñas
Franzua Ricra-Dueñas
Iván Ayala
Eliana Contreras-Lopez
Marcelo Portuguese-Maurtua

Agile diagnostics to determine the concordance between a technology for greywater recycling and the respective needs of potential customers and users 212
José Fernando Guillén
Elvia Breña
Edith Juárez

Geospatial analysis of flood impact sites from a database compiled by the Guadalajara fire department during the rainy season of the 2010-2022 period 249
Maura González
Boris Comi
Jesús López De la Cruz



Contenido
Artículos (originales)
Articles (original)

Aula invertida y el aprendizaje basado en problemas en la enseñanza de la hidrología a estudiantes de ingeniería civil en Cuba, Perú y Mozambique

Maiquel López-Silva

Dayma Carmentes-Hernández

Gladys Requejo-Pacheco

Oscar Brown-Manrique

Albi Mujica-Cervantes

Fernando Brazao-Tembe

Belarmino Guivala

Contaminación de acuíferos y eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales en centros urbanos de Itapúa, Paraguay

Alicia Raquel Eisenkölbl

Rafaela Laino-Guanes

Christian Vogt-Penzkofer

Antonio Benítez-Cañiza

Physicochemical water variations in a big Mexican hydroelectric dam, central semi-arid region

Omar Rivera-Cervantes

Fernando González-Farías

María Guadalupe Ramos-Espinosa

Martín López-Hernández

Política hídrica en Veracruz, una mirada desde la coherencia vertical, la transparencia y el alfabetismo hídrico

María del Carmen Maganda-Ramírez

María del Socorro Aguilar-Cucurachi

Julia Ros-Cuellar

María del Socorro Lara-López

Georgina Vidriales-Chan

Miriam G. Ramos-Escobedo



Contents
Artículos (traducción)
Articles (translation)

Flipped classroom and problem-based learning in teaching hydrology to civil engineering students in Cuba, Peru and Mozambique 295

Maiquel López-Silva

Dayma Carmentes-Hernández

Gladys Requejo-Pacheco

Oscar Brown-Manrique

Albi Mujica-Cervantes

Fernando Brazao-Tembe

Belarmino Guivala

Aquifer contamination and efficiency of wastewater treatment plants in urban centers of Itapúa, Paraguay 327

Alicia Raquel Eisenkölbl

Rafaela Laino-Guanes

Christian Vogt-Penzkofer

Antonio Benítez-Cañiza

Variaciones fisicoquímicas del agua de una gran presa hidroeléctrica mexicana, región centro semiárida 365

Omar Rivera-Cervantes

Fernando González-Farías

María Guadalupe Ramos-Espinosa

Martín López-Hernández

Water policy in Veracruz, a view from the perspective of vertical coherence, transparency, and water literacy 398

María del Carmen Maganda-Ramírez

María del Socorro Aguilar-Cucurachi

Julia Ros-Cuellar

María del Socorro Lara-López

Georgina Vidriales-Chan

Miriam G. Ramos-Escobedo

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-01

Artículos

Análisis táctico integrado de la problemática de los comités de agua potable de Toluca

Integrated tactical analysis of the problems of the drinking water supply committees of Toluca

Edgar Anzures-Valencia¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0511-2573>

Alejandro Tonatiuh Romero-Contreras², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0444-1113>

Carlos Díaz-Delgado³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6245-070X>

¹Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad CEIBAAS (Centro de Estudios e Investigación en Biocultura, Agroecología, Ambiente y Salud), Colima, México, edgar.anzures@ciad.mx

²Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, México, atromeroc18@gmail.com

³Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, México, cdiazd@uaemex.mx

Autor para correspondencia: Edgar Anzures, edgar.anzures@ciad.mx

Resumen

Se analizaron los problemas sociopolíticos, económicos, ambientales y técnico-operativos que padecen los 27 comités de agua potable —de origen antiguo— de Toluca, para identificar los indicadores clave que deben ser atendidos prioritariamente. Este trabajo se realizó con investigación de archivo —trabajo documental y análisis de gabinete— a través de la Técnica de Grupo de Consulta Delphi, basado en una metodología original de combinación de instrumentos y métodos de planeación estratégica participativa con un enfoque de gestión integrada de recursos hídricos. Resultaron 52 indicadores clave que modelan el sistema de gestión de los comités, de los cuales 24 indicadores corresponden al subsistema económico (46.4 %); 19, al subsistema técnico-operativo (35.1 %); y 9, al subsistema sociopolítico (18.5 %). Los resultados encontrados son de utilidad operativa para los comités y pueden ser considerados en la identificación de acciones y alternativas de solución. Se concluyó que los indicadores clave sobre voluntad, participación y compromiso de los actores y usuarios del agua son elementos prioritarios para mejorar la toma de decisiones y resolver la problemática de los comités de agua potable de Toluca.

Palabras clave: gestión comunitaria del agua, metodología PEP-GIRH, matriz de impactos cruzados, indicadores FiPEIR, análisis estructural de sistemas.

Abstract

The problems of sociopolitical, economic, environmental, and technical-operational nature faced by the 27 drinking water supply committees —of

ethnic origin— of Toluca were analyzed to identify the key indicators that require immediate attention. This study employed archival research, documentary analysis, and cabinet reviews, utilizing the Delphi Consultation Group Technique. The methodology employed a unique combinations of instruments and methods from participatory strategic planning and integrated water resources management. A total of 52 key indicators were identified, delineating the management system of the drinking water supply committees of Toluca. Of these, 24 key indicators pertain to the economic subsystem (46.4 %); 19 to the technical-operational subsystem (35.1 %), and 9 to the sociopolitical subsystem (18.5 %). These findings hold practical value for the committees, aiding in the identification of actions and alternative solutions. It was deduced that key indicators related to the will, participation, and commitment of stakeholders and water users are crucial for enhancing decision-making and addressing the issues faced by the drinking water supply committees of Toluca.

Keywords: community water supply management, PSP-IWRM methodology, cross-impact matrix, DPSIR indicators, structural systems analysis.

Recibido: 04/07/2023

Aceptado: 10/10/2023

Publicado *online*: 30/11/2023

Introducción

La Fracción III del artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) establece las funciones y servicios públicos que están a cargo de los municipios mexicanos (CPEUM, 2014, p. 107). Estas entidades gubernamentales, en general, por su ineficiencia e insuficiente capacidad técnica, administrativa y financiera, no llegan a proveer de infraestructura hidráulica a las áreas vulnerables: barrios pobres y marginados. Históricamente, los habitantes de estas áreas, a través de la autogestión y prácticas de gobernanza, encontraron diferentes alternativas de organización para abastecerse de agua, tal es el caso de los comités de agua potable (Anzurez, 2020, p. 1).

En México existe una gran diversidad de tipos de comités de agua potable que operan en zonas rurales, periurbanas y urbanas, dentro de las cuales coexisten: 1) *los comités de origen antiguo*, incorporados o que forman parte del sistema social conocido como sistema de cargos cívico-religioso (Korsback, 2009, pp. 215-242; Campuzano, 2015, pp. 37-44); 2) *los comités formales*, conformados como asociaciones civiles para la distribución y suministro del agua; 3) *los comités ilegales*, no reconocidos legalmente por el Estado; 4) *los comités de reciente creación*, localizados en fraccionamientos urbanos o colonias nuevas; y finalmente, 5) *los comités en situación especial*, que son producto de los trasvases de agua a la ciudad de México: Sistema Lerma y Sistema Cutzamala (Ramírez, 2020, p. 91; Anzurez, 2020, p. 182).

En el presente trabajo nos ocupamos de los *comités de agua potable de origen antiguo*, que son los más difundidos en las comunidades originarias, históricamente habitadas por grupos étnicos con

características mesoamericanas, y que han demostrado haber construido una buena gobernanza hídrica debido en gran parte a su estructura sociocultural (organización social, identidad, costumbres, conocimientos, estructuras familiares y cultura), lo que resulta en buenas prácticas de autogestión que siguen vigentes (sistemas de cargos, comités de agua, ejidos, trabajos comunitarios) (Campuzano, 2019, pp. 52-84).

El número exacto de comités de origen antiguo y su distribución en el país no se conoce, a pesar de estar muy difundidos y ser importantes en el suministro del agua, pero se ha detectado que coexisten con otros tipos de comités y con organismos operadores de agua. Sin embargo, dichos comités otorgan el servicio de agua con limitadas capacidades de gestión; sobre todo, se identifican deficiencias técnico-operativas, además de las administrativas y financieras; asimismo, se detecta la falta de reglamentos internos, insuficientes recursos económicos, problemas de integridad, transparencia y rendición de cuentas.

En la mayoría de los comités de origen antiguo prevalece el conflicto sociopolítico con el Estado neoliberal, derivado de la falta de: 1) reconocimiento legal; 2) recursos económicos; 3) negociación y acuerdos; 4) incorporación de los usuarios, y 5) cogestión (Hernández, 2016, pp. 79-86).

Ante esta situación, la respuesta de las autoridades estatales y sobre todo municipales ha sido magnificar los problemas ya mencionados de los comités, buscando debilitarlos y, si pueden, hasta desaparecerlos, con la intención de apropiarse de su infraestructura hidráulica y obtener los beneficios económicos derivados del control de la gestión del agua. En general, las autoridades de los tres niveles de gobierno ignoran los

derechos sobre el agua de los comités y sus formas de operación consuetudinaria, la cual califican despectivamente como un anacronismo histórico de autogestión hídrica, inoperante e insostenible en el largo plazo que, según ellos, no permite garantizar el abasto de agua (Anzures, 2016, p. 138).

Cabe destacar que los ayuntamientos y los organismos operadores tampoco han sido capaces de un manejo sostenible del agua, pues enfrentan también graves problemas de falta de integridad que se manifiestan de distintas formas (soborno, captura regulatoria, nepotismo, impunidad, desvío de recursos, complicidad) en todas las etapas de la gestión del servicio de agua y saneamiento (otorgamiento de concesiones, descarga de aguas residuales, tomas clandestinas, obras hidráulicas, información incompleta), lo cual ha impedido el acceso al agua y el cumplimiento de este derecho humano (Bolaños, Toledo, & Osorno, s.f., pp. 14-51).

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar y priorizar la problemática hídrica que enfrentan los 27 comités de agua potable (de origen antiguo) del municipio de Toluca (CAPT), para identificar los indicadores clave que deben ser considerados y atendidos prioritariamente en la definición de acciones y alternativas de solución.

El presente trabajo está basado en la metodología de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) (Díaz-Delgado *et al.*, 2009), modificada por Romero *et al.* (2015) con teoría de la organización social y gobernanza del agua, con evidencia de trabajo de campo (entrevistas con informantes clave) y trabajo participativo (conocimiento empírico-práctico). Lo anterior sirvió para la localización, contextualización,

caracterización e identificación de los componentes de los CAPT relacionados con el manejo y la gestión del servicio de agua (estructura, organización, funcionamiento, democracia, gobernanza, identidad).

Así, el análisis y la priorización de la problemática hídrica de los 27 CAPT se aborda desde una perspectiva integrada (GIRH) sobre la base de un proceso de planeación estratégica participativa (planeación táctica) (PEP): *proceso metodológico PEP-GIRH* (Díaz-Delgado *et al.*, 2009; Díaz-Delgado *et al.*, 2017), a través de la *técnica de grupo de consulta Delphi* (Godet, 1993; Godet & Durance, 2011), la cual consiste en la revisión, reflexión y análisis de un amplio rango de estudios e investigaciones ya validadas y discutidas en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA-UAEMéx) (Romero *et al.*, 2015), para la identificación de consensos por el grupo de expertos, y proponer así las mejores decisiones de solución a la problemática hídrica de los 27 CAPT.

De la anterior metodología resultaron 52 indicadores clave prioritarios (34 de enlace, 16 motrices y 2 resultantes), que modelan el sistema de gestión de agua potable de los 27 CAPT, de los cuales: a) 24 indicadores clave (19 de enlace y 5 motrices) corresponden al subsistema económico; b) 19 indicadores (10 de enlace, 8 motrices y 1 resultante) al subsistema técnico-operativo, y c) 9 indicadores (5 de enlace, 3 motrices y 1 resultante) al subsistema sociopolítico.

Se concluye que los *indicadores de enlace* relacionados con la *voluntad, la participación y el compromiso de los actores y usuarios del agua* son los elementos más indispensables que se deben considerar y atender para resolver la problemática hídrica de los 27 CAPT, para mejorar la toma de decisiones.

El presente trabajo pretende colaborar en la solución de la problemática de gestión del agua que enfrentan los 27 CAPT desde una perspectiva GIRH y un proceso de PEP, para mejorar la buena gobernanza y gobernabilidad del agua, sobre todo respetando la historia y los derechos hídricos consuetudinarios de las comunidades originarias y sus CAPT.

A continuación se presenta una breve descripción de los CAPT, luego vienen los antecedentes, el enfoque teórico y los conceptos con el que se ha abordado el presente trabajo. Después se presentan la metodología, los resultados, la discusión y finalmente las conclusiones.

Comités de agua potable de Toluca

Los comités de agua potable aparecieron por primera vez en el municipio de Toluca, Estado de México, durante la década de 1930, con la perforación de cinco pozos; después, en la década de 1950, se incrementaron con la perforación de tres pozos más (Estrada, 2003). A partir de esta década y hasta 1970, los comités se multiplicaron, al igual que los pozos, en las comunidades de Toluca, por iniciativa de la presidenta municipal, Yolanda Senties de Ballesteros, bajo la anuencia y fomento del Estado mexicano (Hinojosa, 2014; Campuzano, 2015).

Al entregarles a la población el consentimiento sobre el recurso hídrico, los comités quedaron regidos por los usos y costumbres de cada pueblo o comunidad, ejercidos a través del derecho consuetudinario (*marco jurídico mesoamericano informal*), que incluye normas sociales, castigos morales, acuerdos no escritos, asambleas comunitarias y cargos honoríficos.

El municipio de Toluca forma parte de la macroárea cultural de Mesoamérica y tiene presencia indígena otomí en 24 delegaciones, en las cuales se encuentran los 27 CAPT: Cacalomacán, Calixtlahuaca, San Andrés Cuexcontitlán, San Antonio Buenavista, San Buenaventura, San Felipe Tlalmimilolpan, San Juan Tilapa, San Lorenzo Tepaltitlán, San Marcos Yachihuacaltepec, San Mateo Oxtotitlán, San Mateo Oztzacatipan, San Pablo Autopan, San Pedro Totoltepec, Santa Ana Tlapaltitlán, Santa María Totoltepec, Santiago Tlacotepec, Tecaxic y Tlachaloya (Figura 1).

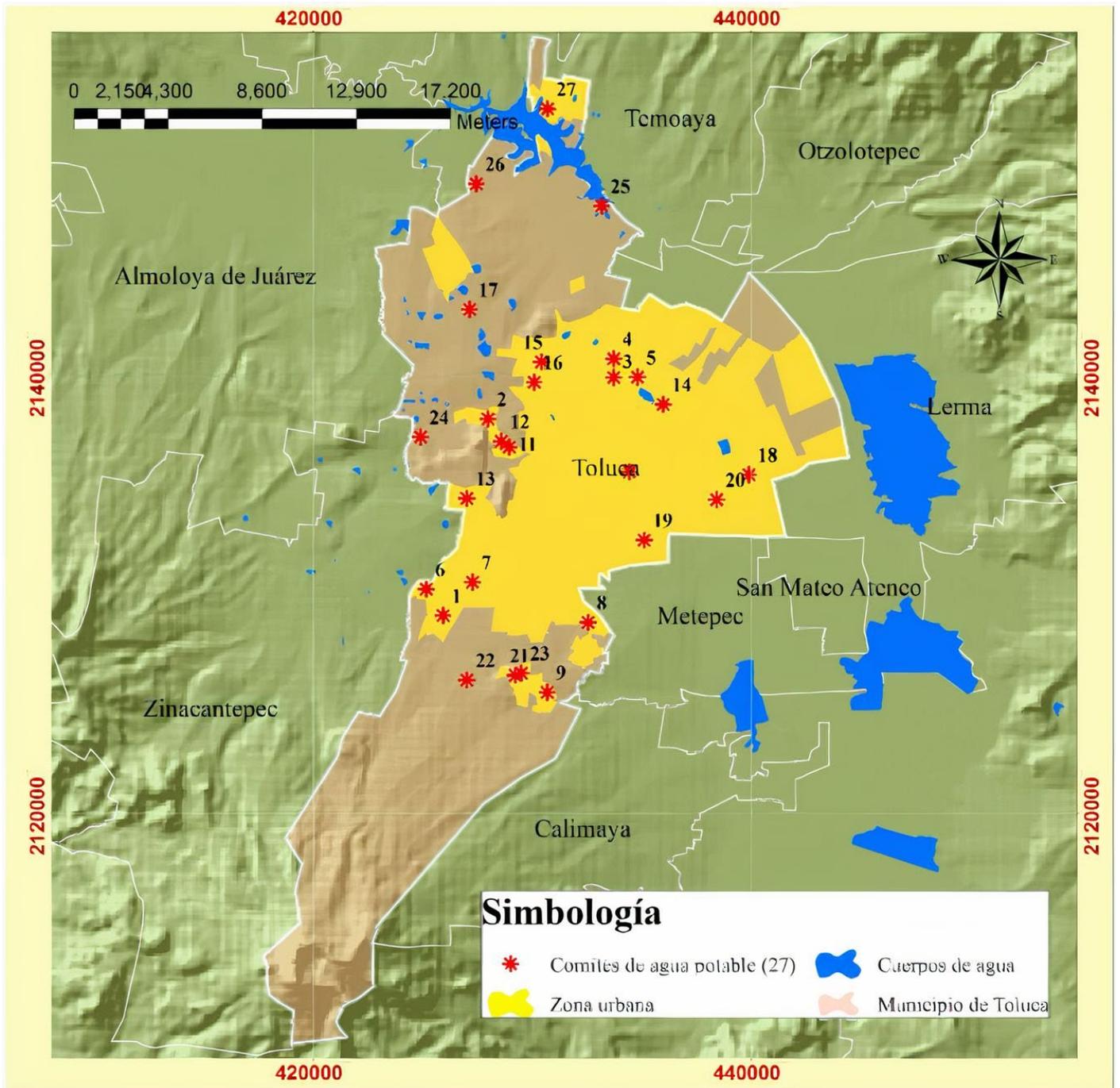


Figura 1. Localización geográfica de los 27 comités de agua potable de Toluca. Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020, p. 96).

Estos 27 CAPT están ubicados en 18 comunidades originarias con características mesoamericanas (identidad comunitaria, asamblea general, cargos honoríficos) y cuentan con una tradición histórica de gobernanza del agua; además, están incorporados a un sistema social conocido como *sistema de cargos cívico-religioso*, el cual es la estructura social más importante de origen antiguo en México (Korsback, 2009; Estrada & Franco, 2004; Hinojosa, 2014; Campuzano, 2015; Gómez, 2016; Campuzano, 2019).

Estos CAPT, con persistencia histórica de autogestión, abastecen de agua potable a más del 51 % de la población de Toluca, con la operación de 34 pozos, un ramal del Sistema Cutzamala, manantiales y pipas. Como característica general, los CAPT están a cargo de los mismos usuarios, quienes, por consenso y votación en la asamblea general del pueblo, eligen al comité que administrará, operará y dará mantenimiento a los sistemas de agua por el término de tiempo especificado (Hinojosa, 2014).

Gestión comunitaria del agua

Los estudios antecedentes sobre gestión comunitaria del agua desarrollados en México y América Latina (Ostrom, 2000; Ampuero, Faysse, & Quiroz, 2005; Aguilar, 2011; Hinojosa-Peña, Romero-Contreras, & Hernández-Téllez, 2013; Becerril-Tinoco & De Alba-Murrieta, 2014; Díaz, 2014; Escobar, 2015) se han abordado parcialmente desde distintas disciplinas (antropología, sociología, geografía humana, planificación), casi siempre con un enfoque mono-sectorial basado en diferentes perspectivas teóricas: redes, capital social, bienes comunes,

gestión colaborativa o cogestión, destacando en todas: 1) las potencialidades, ventajas y beneficios que ofrece la gestión comunitaria auto-organizada; 2) la importancia de la asamblea general comunitaria; 3) la necesidad de su reconocimiento legal, y 4) la eficiencia y eficacia en la aplicación de arreglos organizacionales y prácticas democráticas para lograr el autogobierno local y la gobernanza general. Sin embargo, la mayoría de estos estudios carecen de un enfoque sistémico (Galindo & Palerm, 2007; Giménez & Palerm, 2007; López, Martínez, & Palerm, 2013; Bastian & Vargas, 2015; Vargas, 2015).

Otras investigaciones sobre gestión comunitaria del agua han documentado: 1) el manejo y gestión que realizan los comités de agua potable frente a organismos operadores y direcciones municipales; 2) la participación de las mujeres en la toma de decisiones, y 3) las controversias que ha generado la municipalización del servicio de agua potable (Galindo & Palerm, 2007; Sandoval, 2011; Pimentel, Velázquez, & Palerm, 2012; Galindo & Palerm, 2012; Sandoval & Griselda, 2013; Gutiérrez, Nazar, Zapata, Contreras, & Salvatierra, 2013; Galindo & Palerm, 2016; Anzurez, 2016; Gómez, 2016; Gómez, Romero, & Vizcarra, 2017; Cadena & Salgado, 2017; Cadena & Morales, 2020). Todos estos estudios-antecedentes tienden a homogeneizar la organización social del agua como si se tratara de un manejo y gestión uniforme en los diversos países y regiones, pero en general, dichos estudios se encuentran inclinados hacia dos lados opuestos. El primero, en favorecer la independencia de los comités, pues han demostrado ser buenos gestores y contribuir a la buena gobernanza hídrica en sus comunidades para la resolución de conflictos, la equidad en la distribución del recurso, la participación en la toma de decisiones y la aplicación efectiva de sanciones

y castigos sociales. El segundo, en desaparecer a los comités de agua, por considerarlos ineficientes y poco efectivos en el manejo y la gestión del recurso, además de carecer de reconocimiento legal ante el Estado y operar fuera de la legislación nacional vigente en materia de aguas. Ambas inclinaciones aportan pocas soluciones concretas a los problemas hídricos que enfrentan los comités, sin ser analizados por procesos sistémicos; en ambas posturas se identifican conocimientos separados y escasas relaciones entre los problemas hídricos.

Gestión integrada de recursos hídricos (GIRH)

La Asociación Mundial del Agua define el concepto de la GIRH como un proceso que promueve el desarrollo y gestión coordinada del agua, suelo y recursos asociados, con la finalidad de maximizar el beneficio económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (Díaz-Delgado *et al.*, 2009, p. 30).

El concepto de GIRH ha evolucionado como lo ha hecho la relación agua, sociedad y ambiente. Los antecedentes del concepto surgieron y han estado presentes desde la primera Conferencia Internacional del Agua en Mar de la Plata (Argentina) en 1977, donde se expresó la necesidad de propiciar la coordinación en el sector hídrico. Esto, como respuesta a los problemas mundiales de la escasez del recurso, el cambio climático, la contaminación creciente y la preocupación de que los recursos de agua dulce están bajo amenaza causada por el crecimiento poblacional (WGF, 2009, p. 11; Manzano, 2017, p. 53).

Diversos autores están de acuerdo con el enfoque integrador abierto y flexible de la GIRH, que involucra el conocimiento coordinado de una

diversidad de sistemas que deben considerarse de forma simultánea bajo distintas disciplinas, concepciones e investigaciones, así como las perspectivas de diversos actores-grupos de interés (sociales, políticos, económicos, académicos, gubernamentales), para implementar soluciones eficientes, equitativas y sostenibles, y tomar decisiones balanceadas (Díaz-Delgado *et al.*, 2009, p. 31).

La tendencia actual de la GIRH considera el trabajo “local o comunitario” como una oportunidad para desarrollar experiencias prácticas. Igualmente, aprecia que el enfoque antropológico participativo es más sostenible y eficiente tanto desde el punto de vista institucional como técnico, pues atiende las necesidades y prioridades de los usuarios. La planeación para la gestión del agua, la toma de decisiones y la propuesta de políticas debe estar basada en las necesidades y prioridades de las comunidades locales, considerando la participación de todos los actores de interés (mujeres, jóvenes, campesinos e indígenas) del nivel comunitario en el marco de una política de desarrollo económico a nivel nacional (Manzano, 2017, p. 58).

Planeación estratégica participativa (fase táctica) (PEP) y GIRH

La planeación estratégica es un proceso de reflexión que permite organizar y estructurar las acciones requeridas para que una organización o empresa llegue a una posición futura deseada, considerando los aspectos internos y externos en el que se desenvuelve e interactúa, de manera que se enfoque en lo que debe hacerse para lograr el resultado esperado. Manzano (2017, p. 59) señala que cuando la planeación

estratégica se abre a todo aquel actor de la organización interesado en participar, y no se limita solo a la esfera directiva, entonces se habla de una planeación estratégica participativa (PEP). En efecto, éste es un proceso sistemático y sistémico que integra el desarrollo de conocimiento intuitivo y analítico mediante la participación de los actores-grupos de interés involucrados, quienes a su vez se ven influenciados por el accionar de un plan estratégico (Díaz-Delgado *et al.*, 2009, p. 27).

De acuerdo con Díaz-Delgado *et al.* (2017), *ambos procesos (PEP y GIRH) mantienen la perspectiva holística y se enfocan en lo que realmente importa (factores clave y sus principales interacciones)*, a fin de promover el desarrollo sostenible y la gestión coordinada del socioecosistema para maximizar el beneficio socioeconómico. El proceso PEP-GIRH facilita la construcción de consensos, y compromisos, entre los actores involucrados, para reconocer y compartir valores y principios, lo cual conlleva al análisis causa-efecto de la situación para la identificación, selección y alineamiento de objetivos estratégicos, reconociendo prioridades y sus mejores rutas de solución: planeación táctica y de largo plazo (Díaz-Delgado *et al.*, 2009, p. 29).

La planeación táctica se basa en un enfoque más analítico que intuitivo, a fin de definir acciones específicas en el corto plazo para obtener un alto *rendimiento* (eficiencia y eficacia). Este tipo de planeación se utiliza para organizar y delinear los programas, proyectos y acciones de alto impacto que enfoquen la atención de problemas concretos, cuya solución plantea un cambio de “estado” en todo el sistema en el corto plazo (Díaz-Delgado *et al.*, 2009, p. 28).

Indicadores FIPEIR

Los indicadores son herramientas metodológicas que pueden ser utilizados en un proceso de planeación estratégica participativa con un enfoque sistémico (PEP-GIRH), que ayudan a medir y evaluar el progreso del desarrollo sostenible, jugando un doble papel: 1) como constructores de conocimiento, y 2) como instrumentos para el diseño, implementación y evaluación de las políticas públicas (Díaz-Delgado *et al.*, 2009, p. 33).

Los indicadores proporcionan señales que relacionan mensajes complejos potencialmente de innumerables orígenes en forma simplificada y útil. Estos indicadores deben satisfacer las siguientes características: 1) tener una definición clara y sin ambigüedades; 2) ser medibles en términos cualitativos o cuantitativos; 3) ser factibles de implementar en cuanto a recursos disponibles; 4) ser relevantes para el tema en cuestión, y 5) ser sensibles a los cambios que puedan ocurrir en la legislación vigente (Díaz-Delgado *et al.*, 2017).

Los indicadores han sido empleados en distintas etapas de la valoración del ambiente, y han evolucionado de sistemas de indicadores simples (*PER: presión-estado-respuesta*) a sistemas más completos como lo es el sistema FIPEIR (*fuerzas impulsoras-presión-estado-impacto-respuesta*), con la finalidad de brindar un panorama lo más sistémico posible. El modelo de indicadores FIPEIR busca establecer las interconexiones “causa-efecto” entre las dimensiones del análisis sistémico (sectores económico, social y ambiental). Su lógica general es que ciertas fuerzas impulsoras (Fi) conducen a que se ejerza una mayor presión (P) sobre los recursos naturales, lo que a su vez altera o modifica su estado natural (E) en calidad y cantidad, traduciéndose en impactos

(I) tanto positivos como negativos hacia la sociedad y el ambiente (escasez, exceso), tras lo cual estos subsistemas responden (R) con adaptaciones en el caso ambiental, y con acciones, políticas y estrategias en el caso del subsistema social, para prevenir, minimizar o mitigar los impactos negativos y aprovechar los positivos (Díaz-Delgado *et al.*, 2017).

El sistema de indicadores FiPEIR ofrece mayores ventajas para el desarrollo de un proceso de planeación estratégica dentro de la temática de la GIRH, porque proporciona información útil para: 1) mejorar el conocimiento con la visión de un socioecosistema; 2) construir consensos en torno a objetivos y metas compartidas para intervenir en sus procesos; 3) diagnosticar, evaluar y dar seguimiento a los resultados derivados de dichas intervenciones (Díaz-Delgado *et al.*, 2009, p. 33).

Los indicadores del sistema FiPEIR describen una cadena causal que facilita el análisis de los orígenes, las consecuencias y las respuestas de los cambios que pueden ocurrir en el sistema de gestión de los 27 CAPT. La simplificación de los indicadores FiPEIR es posible a través del análisis estructural de sistemas (Godet, 1993; Godet & Durance, 2011), que facilita la identificación de los indicadores más influyentes y más dependientes para la evolución de los sistemas, es decir, *los indicadores clave prioritarios*.

Análisis estructural de sistemas

El análisis estructural es una forma de pensamiento que permite obtener una representación amplia de un sistema. Es decir, se modela una realidad para comprender y estudiar la estructura de las relaciones entre

las variables que caracterizan un sistema. Para ello, se considera que un sistema es un conjunto de elementos relacionados entre sí, y la estructura del sistema es la red de relaciones entre los elementos, lo cual es esencial para comprender su dinámica y evolución, pues esa estructura conserva cierta permanencia (Godet, 1993, p. 73).

El análisis estructural es un método sistemático, en forma matricial, de análisis de las relaciones entre las variables constitutivas del sistema estudiado y las de su entorno explicativo. Este método tiene como objetivo destacar las principales variables influyentes y dependientes, para luego identificar las variables clave causantes de la evolución del sistema (Godet & Durance, 2011, p. 64).

El análisis estructural de sistemas se divide en tres etapas sucesivas: 1) inventariar las variables; 2) describir las relaciones existentes entre las variables, y 3) identificar las variables clave (Godet, 1993, pp. 75-106; Godet & Durance, 2011, pp. 64-68).

1. Inventariar las variables: consiste en hacer un inventario de las variables que caracterizan al sistema estudiado y su entorno (internas y externas). La definición precisa de cada variable es indispensable para el posterior análisis de interrelación y permite constituir con más facilidad la base necesaria para toda reflexión prospectiva.

2. Describir las relaciones existentes entre las variables: una variable solo existe a través de su interrelación con otras variables. El análisis estructural permite identificar esas relaciones entre variables utilizando una tabla de dos entradas llamada "matriz de análisis estructural". El llenado de la matriz es cualitativo a través de una evaluación por pares de variables, preguntándose: ¿existe una

relación de influencia positiva entre la variable i y la variable j ? Si la respuesta es negativa, se coloca 0; si la respuesta es positiva, se coloca 1.

3. Identificar las variables clave: consiste en identificar las variables esenciales para la evolución del sistema. La identificación se hace primero gracias a una clasificación directa de fácil realización y después por una clasificación indirecta llamada “matriz de impactos cruzados multiplicación aplicada a una clasificación” (MICMAC), que se obtiene previa potenciación de la matriz inicial. La comparación de la jerarquía de las variables en las diferentes clasificaciones (directa, indirecta y potencial) permite confirmar la importancia de ciertas variables, así como descubrir variables que desempeñan un papel preponderante, aunque no hayan sido detectadas por la clasificación directa. Los resultados del método MICMAC pueden ser representados por su posición en los cuadrantes de un plano cartesiano con ejes de influencia vs. dependencia, en el cual se pueden distinguir cinco tipos de variables: 1) de entrada, 2) de enlace, 3) resultantes, 4) excluidas y 5) del pelotón (Figura 2).

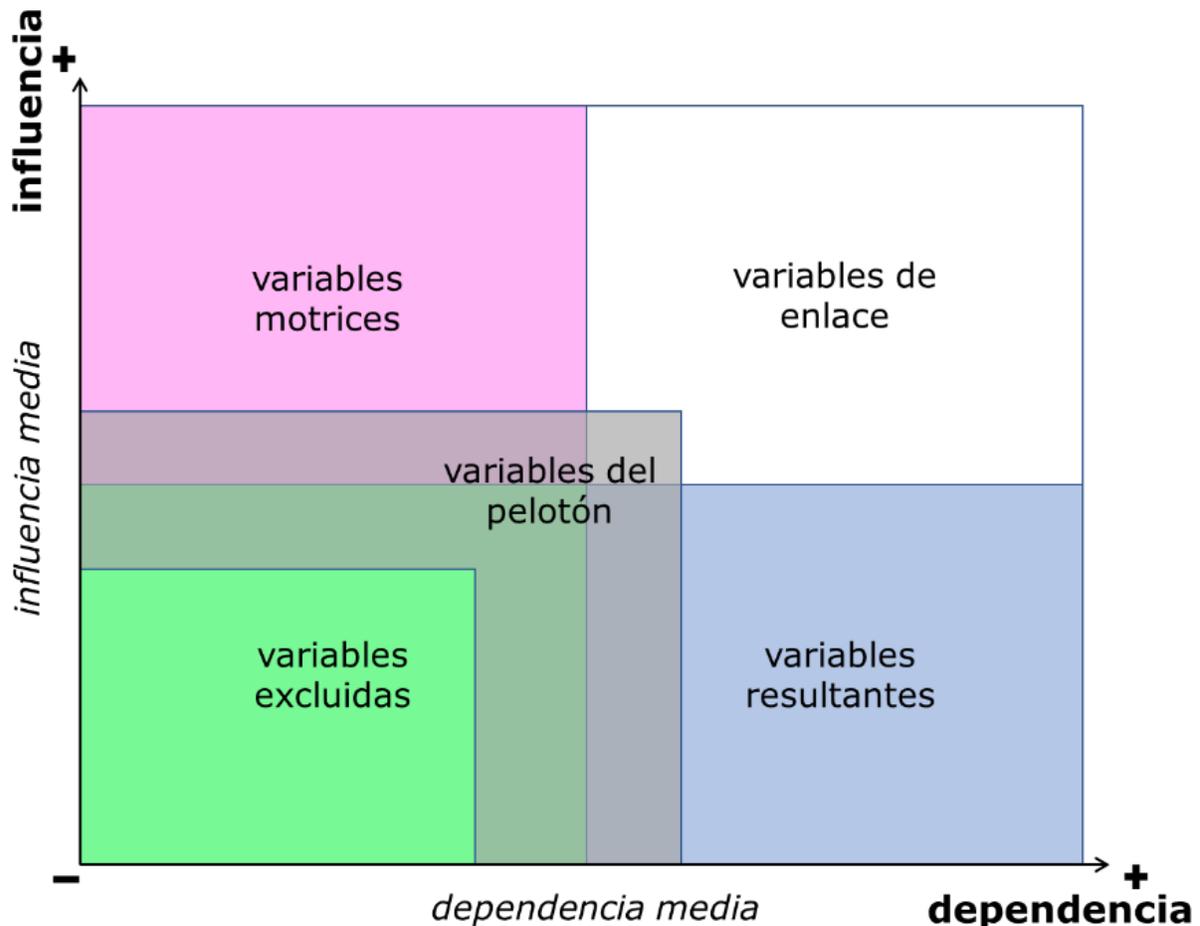


Figura 2. Los diferentes tipos de variable en el plano de influencia-dependencia. Fuente: elaboración de los autores con base en Godet y Durance (2011, p. 67).

De acuerdo con la Figura 2, las *variables excluidas* (cuadrante inferior izquierdo) no ejercen influencia ni dependencia sobre el resto del sistema, y su modificación tampoco tiene consecuencias significativas en el sistema. La evolución de las *variables resultantes* (cuadrante inferior derecho) es consecuencia de la motricidad de las variables de los cuadrantes superiores (motrices y de enlace), ya que ellas son sus

principales causas. El comportamiento de las *variables motrices* (cuadrante superior izquierdo) condiciona la dinámica del sistema, ya que influyen sobre el resto de las variables del sistema, al mismo tiempo que pocas o ninguna influyen sobre ellas. Las *variables de enlace* (cuadrante superior derecho) influyen en el comportamiento de otras variables (resultantes), pero también reciben influencia de otras variables del propio sistema (motrices); estas variables son inestables, pues toda acción sobre ellas tendrá repercusiones sobre los demás y sobre ellas mismas por un efecto de retorno que potencia o reduce su impulso inicial. Las *variables del pelotón* son aquellas que no se pueden definir claramente como influyentes o dependientes, y su modificación no tiene consecuencias significativas en el resto del sistema. Por esta razón, las *variables excluidas y del pelotón* son ignoradas y quedan fuera de la identificación de las variables clave (Godet & Durance, 2011).

El análisis estructural permite reducir la complejidad del sistema estudiado e identificar las variables clave. Su utilidad es estimular la reflexión e interpretación sobre los aspectos contraintuitivos del comportamiento de un sistema. La intención de esta herramienta es permitir la estructuración de la reflexión colectiva, reduciendo las inevitables desviaciones (Godet & Durance, 2011, p. 68).

Metodología

Este trabajo se realizó mediante investigación de archivo (trabajo documental y análisis de gabinete) con base en la *técnica de grupo de consulta Delphi* (Godet, 1993, pp. 144-147; Godet & Durance, 2011, pp. 76-78), que consistió en la revisión, reflexión y análisis de un amplio

rango de estudios e investigaciones sobre organización social y gobernanza del agua ya validados y discutidos en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA-UAEMéx), para la identificación de consensos por un grupo de expertos (autores de tesis de posgrado), y así tomar mejores decisiones en torno a la problemática hídrica de los CAPT, específicamente en el llenado de las matrices de datos.

Se empleó una metodología original e innovadora estructurada por Díaz-Delgado *et al.* (2009) y Díaz-Delgado *et al.* (2017), que combina instrumentos y métodos de planeación estratégica participativa (fase táctica) con enfoque integrado, que permitió la secuencia metodológica de cuatro fases de análisis (proceso PEP-GIRH).

Fase 1. Identificación de las áreas estratégicas de planeación y articulación (AEPA): consistió en definir las áreas estratégicas que mejor conllevan el análisis de la problemática.

Fase 2. Identificación de factores críticos de éxito (FCE): consistió en identificar conjuntos de problemas, los cuales fueron clasificados para cada una de las AEPA y de acuerdo con el análisis FLOA (fortaleza-limitación-oportunidad-amenaza). Después se construyeron los modelos conceptuales de la problemática hídrica (uno por AEPA) para tener una visión general de los problemas y ubicar las relaciones que existen entre ellos. Finalmente, los conjuntos de problemas (uno por AEPA) fueron analizados y reducidos bajo el instrumento de la *matriz cruzada de importancia* para obtener los FCE. Para ello, se construyeron las matrices (una por cada AEPA) y se contrastaron todos los problemas contra ellos mismos. El llenado de cada matriz se realizó preguntándose:

¿el problema crítico colocado en el renglón es más importante que el colocado en la columna? Si la respuesta fue positiva, se colocó un "1"; en caso contrario, se colocó un "0" (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz cruzada de importancia.

¿El problema crítico colocado en el renglón es más importante que el colocado en la columna?	Problema crítico 1	Problema crítico 2	Problema crítico 3	Problema crítico 4	Problema crítico 5	Problema crítico 6	Problema crítico 7...	Problema crítico <i>n</i>	Total
Problema crítico 1		1	0	0	1	0	1	1	4
Problema crítico 2			0	0	1	0	1	1	3
Problema crítico 3				1	1	1	1	1	5
Problema crítico 4					1	1	1	0	3
Problema crítico 5						0	1	1	2
Problema crítico 6							1	1	2
Problema crítico 7...								0	0
Problema crítico <i>n</i>									0
Suma vertical	0	0	2	2	0	3	0	2	
Suma horizontal	4	3	5	3	2	2	0	0	
Total	4	3	7	5	2	5	0	2	

Fuente: elaboración de los autores con base en Zepeda (2017, p. 98).

En cada matriz se sumó el total de 1 en cada renglón y el total de 0 en cada columna. Después, se sumaron ambos resultados para obtener

la suma total de 0 y 1. Finalmente, se seleccionaron los tres principales problemas con una suma mayor obtenida, los cuales constituyeron los FCE.

Fase 3. Identificación y definición del sistema de indicadores fuerza impulsora-presión-estado-impacto-respuesta (FiPEIR): dado que en la fase anterior se identificaron los FCE, la siguiente fase del proceso consistió en identificar y definir un conjunto de indicadores bajo el esquema FiPEIR, lo cual permite identificar y comprender la red de relaciones causa-efecto de la problemática hídrica. Sin embargo, por su complejidad analítica en la identificación y definición de los indicadores FiPEIR, se elaboró una plantilla de apoyo para definir y obtener una valoración cuantitativa o cualitativa de cada indicador, la cual registró el tipo de AEPA, el FCE, la condición FLOA, y las cuestiones que deben responder cada uno de los indicadores FiPEIR (Figura 3).

AEPA: _____ FCE: _____ FLOA: _____

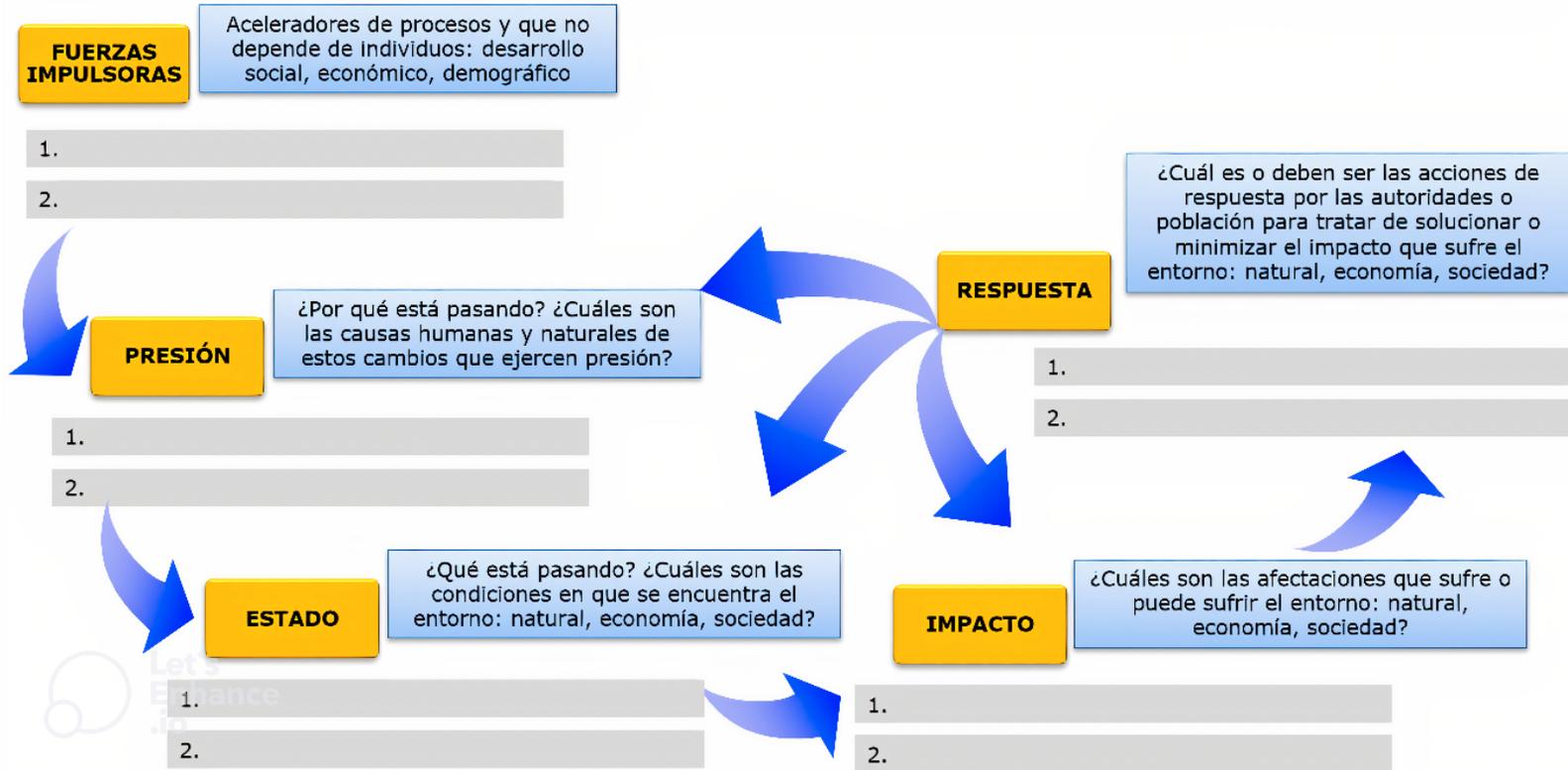


Figura 3. Plantilla de apoyo para la identificación y definición de los indicadores FiPEIR. Fuente: elaboración de los autores con base en Díaz-Delgado *et al.* (2009, p. 34).

Esta herramienta con enfoque sistémico permitió reflexionar y analizar detenidamente (sin desvíos) las causas, consecuencias y respuestas a los cambios de cada FCE, al tiempo que ayudó a comprender la red de relaciones causa-efecto del sistema.

Fase 4. Análisis estructural de sistemas: consistió en reducir la complejidad del sistema y encontrar los indicadores clave, lo cual se logró a través de tres pasos: 1) inventario de indicadores del sistema; 2)

descripción de las relaciones entre indicadores; 3) identificación de los indicadores clave (Godet, 1993; Godet & Durance, 2011).

1. Inventario de indicadores del sistema. Correspondió al conjunto de indicadores obtenidos en la fase anterior.
2. Descripción de las relaciones entre los indicadores. Consistió en identificar, analizar, discutir y consensuar las relaciones entre pares de indicadores a través de la matriz de impactos cruzados, donde renglones "X" y columnas "Y" enlistaron a los indicadores que modelan el sistema. Se realizó una evaluación por pares de indicadores, preguntándose: ¿Un cambio positivo en el estatus del primer indicador (listado en el renglón) implica de forma directa que también cambie positivamente el estatus de un segundo indicador (listado en la columna)? Esta pregunta se aplicó a cada indicador con respecto al resto de los mismos para obtener un cruce de todos los indicadores contra ellos mismos (Godet, 1993; Godet & Durance, 2011). Si la respuesta fue afirmativa, se colocó un 1; en caso contrario, se colocó un 0. Se utilizó esta lógica de 0 y 1 para responder tajantemente si existe o no relación de influencia directa en cada evaluación (Manzano, 2017, p. 86; Díaz-Delgado *et al.*, 2017).

El llenado de la matriz de análisis estructural se realizó con el apoyo de la aplicación informática *Llena MID* (Manzano, 2017), con la cual se obtuvo la matriz de influencia directa (MID) de 0 y 1, donde la suma de los valores de la línea de cada indicador representó la magnitud de influencia para modificar positivamente el estado del sistema y, a su vez, la suma de los valores de su columna respectiva representó la

dependencia de su mejora, la cual estuvo supeditada a los cambios positivos de otros indicadores (Díaz-Delgado *et al.*, 2017).

3. Identificación de los indicadores clave. Se realizó con el apoyo del *software* MoSoPEP-GIRH&CMI (Zepeda, 2017), donde la MID (resultado del paso anterior) fue el insumo primordial para procesarla y generar automáticamente tres matrices (influencia indirecta, resultado e influencia total), cuatros planos (influencia directa, influencia indirecta, desplazamiento e influencia total) y un gráfico de la red de relaciones del sistema. Asimismo, el *software* clasificó los indicadores en cinco grupos: 1) motrices, 2) de enlace, 3) del pelotón, 4) excluidos y 5) resultantes, mismos que gráficamente estuvieron representados por su posición en los cuadrantes de un plano cartesiano con ejes de influencia vs. dependencia.

La anterior secuencia metodológica PEP-GIRH permitió identificar, analizar y comprender la problemática hídrica de los CAPT con enfoque integrado; identificar y priorizar los problemas críticos (FCE); identificar y definir el sistema de indicadores FiPEIR; reducir el número de indicadores, e identificar los indicadores clave.

Dicha propuesta metodológica ha sido ajustada y afinada por Romero *et al.* (2015), con su aplicación a estudios de tesis de posgrado con teoría de gobernanza del agua y organización social en la línea de investigación de gestión integrada del agua del IITCA-UAEMéx. Así, el estudio de los CAPT se fundamentó en la evidencia de trabajo de campo (entrevistas con informantes clave) realizado intensivamente durante el desarrollo de las investigaciones de Campuzano (2015) y Gómez (2016),

las cuales sirvieron para la identificación y descripción de los CAPT (estructura, organización, funcionamiento), además de ser analizados como parte del sistema de cargos cívico-religioso relacionados con el manejo y la gestión social del agua: identidad, equidad, cooperación, participación, democracia, gobernanza.

Por su parte, Anzures (2016) y Anzures (2020), con conocimiento empírico-práctico del trabajo participativo en un CAPT, identificó y caracterizó la problemática hídrica de los CAPT, obteniendo información en: 1) diarios de circulación estatal (*El Sol de Toluca, Milenio, El Gráfico, La Jornada, Impulso*) durante el periodo 2014-2020; 2) el 2do y 3er Seminario-Taller "Problemáticas y Estudios sobre el Agua en el Estado de México"; 3) el Foro: ¿Qué ley de aguas necesita México para garantizar el derecho humano al agua?, como parte de las actividades de la red de "estudios críticos del agua", desarrolladas en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) de agosto de 2017 a febrero de 2019.

Por lo tanto, el presente trabajo ya no requirió de más investigación de trabajo de campo, sino que utilizó los datos y la información ya validada y discutida en las anteriores tesis de posgrado sobre gobernanza del agua, gestión comunitaria, autogestión, identidad comunitaria y cooperación, entre otros, que sirvieron para el estado del arte en la conceptualización e interpretación de la información teórico-conceptual, así como en la identificación y definición de la problemática hídrica.

El estudio de los CAPT a través de procesos sistémicos está vinculado teórica y metodológicamente con otras tesis de posgrado desarrolladas en el IITCA por Manzano (2007), Zepeda (2012), García (2016), Manzano (2017), Zepeda (2017) y Bernal (2017), quienes

emplearon el enfoque PEP-GIRH, indicadores sistémicos (PER, PEIR, FiPEIR), y el análisis estructural de sistemas en cuencas hidrológicas e hidrosociales, y además desarrollaron *software*, modelos hidrogeomáticos y herramientas de apoyo al proceso metodológico PEP-GIRH.

Resultados

Se identificaron y definieron cuatro áreas estratégicas de planeación y articulación (AEPA) para abordar el análisis de la problemática hídrica de los 27 CAPT: 1) sociopolítica, 2) económica, 3) ambiental, y 4) técnico-operativa, las cuales constituyeron las dimensiones mínimas de análisis con base en los tres grandes pilares interrelacionados del desarrollo sostenible. El cuarto eje incorporó el nivel de organización y la capacidad sobre conocimiento e información (Tabla 2).

Tabla 2. AEPA que definen la problemática hídrica de los CAPT.

AEPA	Contenido
Sociopolítica	Comprende aspectos internos y externos de los CAPT: sociales, históricos, culturales, políticos, gobernabilidad, gobernanza, identidad, equidad, autogestión, género, participación, organización, funcionamiento, cogestión, toma de decisiones
Económica	Incorpora aspectos financieros de los CAPT tanto internos como externos: situación económica, gastos, pagos de agua, rezagos, exenciones, sanciones, castigos, integridad, transparencia, rendición de cuentas, corrupción
Ambiental	Incluye los aspectos ambientales (internos y externos) de los CAPT: fuentes de abastecimiento, calidad del agua, disponibilidad del agua, descargas de aguas residuales, tratamiento del agua
Técnico-operativa	Incluye los aspectos técnicos y operativos (internos y externos) de los CAPT: capacidades y habilidades de los actores, infraestructura hidráulica (redes de distribución del agua entubada, fugas de agua, volumen de agua extraído), conocimiento, disponibilidad de la información, padrón de usuarios, tomas domiciliarias, población atendida, suministro

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020, p. 102).

Se identificó una lista de 89 problemas que padecen los 27 CAPT, que fueron clasificados para cada categoría FLOA y para cada una de las cuatro AEPA: 29 problemas en la AEPA sociopolítica; 18, en la AEPA ambiental; 23, en la AEPA económica; y 19, en la AEPA técnico-operativa (Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6).

Tabla 3. AEPA sociopolítica: análisis FLOA de los problemas críticos de los CAPT.

Fortalezas	Limitaciones	Oportunidades	Amenazas
1. Contexto sociohistórico de larga duración	1. Inequidad social en el abastecimiento del agua	1. Usos y costumbres reconocidos en la CPEUM	1. Conflictos sociopolíticos por el agua
2. Sistema de cargos cívico-religiosos	2. Inequidad social en el pago del agua	2. Apoyo de ONG y centros de investigación	2. Falta de cooperación con dependencias de gobierno
3. Legitimidad del comité ante los usuarios	3. Inequidad social en el establecimiento de las tarifas	3. Diversidad de etnias en zonas rurales y urbanas	3. Falta de legalidad del comité ante el Estado
4. Asamblea general comunitaria	4. Desigualdad de género en los cargos del comité	4. Servicio e infraestructura en zonas urbanas por comités	4. Ley de Aguas Nacionales
5. Identidad comunitaria	5. Falta de reglamentos internos en el comité	5. Incremento y diversidad de tipologías de comités	5. Zonas con marginación y pobreza extrema
6. Formas de elección de los actores del comité	6. Escasa participación social en las asambleas y cargos del comité	6. Buena gobernanza del agua	6. Migración y crecimiento poblacional
7. Autogestión	7. Escaso número de asambleas al año		7. Falta de buena gobernabilidad del agua
	8. Falta de títulos de concesión		
	9. Exclusión social por no tener identidad comunitaria		

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzurez (2020).

Tabla 4. AEPA ambiental: análisis FLOA de los problemas críticos de los CAPT.

Fortalezas	Limitaciones	Oportunidades	Amenazas
1. Tandeos 2. Gobernanza ambiental	1. Fugas de agua 2. Falta de potabilización 3. Falta de tratamiento simple de aguas residuales domésticas 4. Falta de disposición final de las aguas residuales domésticas	1. Utilización de aguas pluviales 2. Uso de manantiales 3. Perforación de pozos a mayor profundidad	1. Sobreexplotación de los acuíferos 2. Contaminación de los acuíferos 3. Contaminación de cuerpos de agua superficiales 4. Pozos clandestinos, tomas clandestinas y conexiones irregulares 5. Escasez de disponibilidad de agua y mala calidad de agua 6. Cambios climáticos 7. Sequía 8. Erosión del suelo 9. Cambios en el uso de suelo

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzurez (2020).

Tabla 5. AEPA económica: análisis FLOA de los problemas críticos de los CAPT.

Fortalezas	Limitaciones	Oportunidades	Amenazas
1. Descuentos o facilidades de pago a usuarios en situación especial 2. Voluntariedad de los actores del comité 3. Modificación y ajustes de tarifas en asamblea 4. El tequio (faenas comunitarias) 5. Periodos cortos de administración	1. Deudas históricas ante Conagua, CAEM y CFE 2. Insuficiencia financiera 3. Tarifas bajas 4. Recaudación baja 5. Escasez de pago a los actores del comité 6. Faltas de integridad de los actores del comité 7. Falta de mecanismos de transparencia y rendición de cuentas 8. Exenciones de pago a instituciones sociales y usuarios de la tercera edad 9. Falta de mecanismos para mejorar la recaudación 10. Escasez de reglamento interno para sancionar faltas de integridad 11. Periodos prolongados de administración	1. Consejo de Vigilancia, Comisión Revisora, Consejo de Honor y Justicia 2. Cultura social (presión) para cubrir las cuotas del agua 3. Cogestión con autoridades municipales 4. Apoyo de ONG y centros de investigación	1. Usuarios morosos y rezagados en sus pagos 2. Tomas clandestinas y conexiones irregulares 3. Costos de expansión y mantenimiento de las redes de distribución de agua

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020).

Tabla 6. AEPA técnico-operativa: análisis FLOA de los problemas críticos de los CAPT.

Fortalezas	Limitaciones	Oportunidades	Amenazas
1. Organización interna creada y diseñada por los propios usuarios 2. Voluntariedad de los actores del comité 3. Contratación de servicios especializados 4. Tandeos 5. Autogestión 6. Conocimiento empírico-práctico de los actores del comité	1. Infraestructura hidráulica deficiente e insuficiente 2. Escasez de datos, y de información confiable y precisa 3. Escasez de actores en el comité 4. Falta de personal especializado en materia de agua 5. Falta de manual de organización y funcionamiento del comité 6. Falta de sistemas electrónicos para el manejo de datos e información 7. Métodos manuales de registro, control y administración 8. Falta de guías de operación y procedimientos técnicos	1. Participación externa relacionada con el comité 2. Apoyo de ONG y centros de investigación 3. Empleo de sistemas electrónicos para el manejo de datos e información digital	1. Falta de asesorías y capacitación integral a los actores del comité 2. Demanda y expansión de las redes de distribución hídrica por el crecimiento poblacional

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020).

Después de identificar y definir los problemas de los CAPT en las matrices FLOA por AEPA, se construyeron los modelos conceptuales para mejorar el conocimiento del sistema, tener una visión global y ubicar las relaciones existentes entre los problemas. Por razones de espacio, solo se muestra un modelo conceptual (Figura 4).

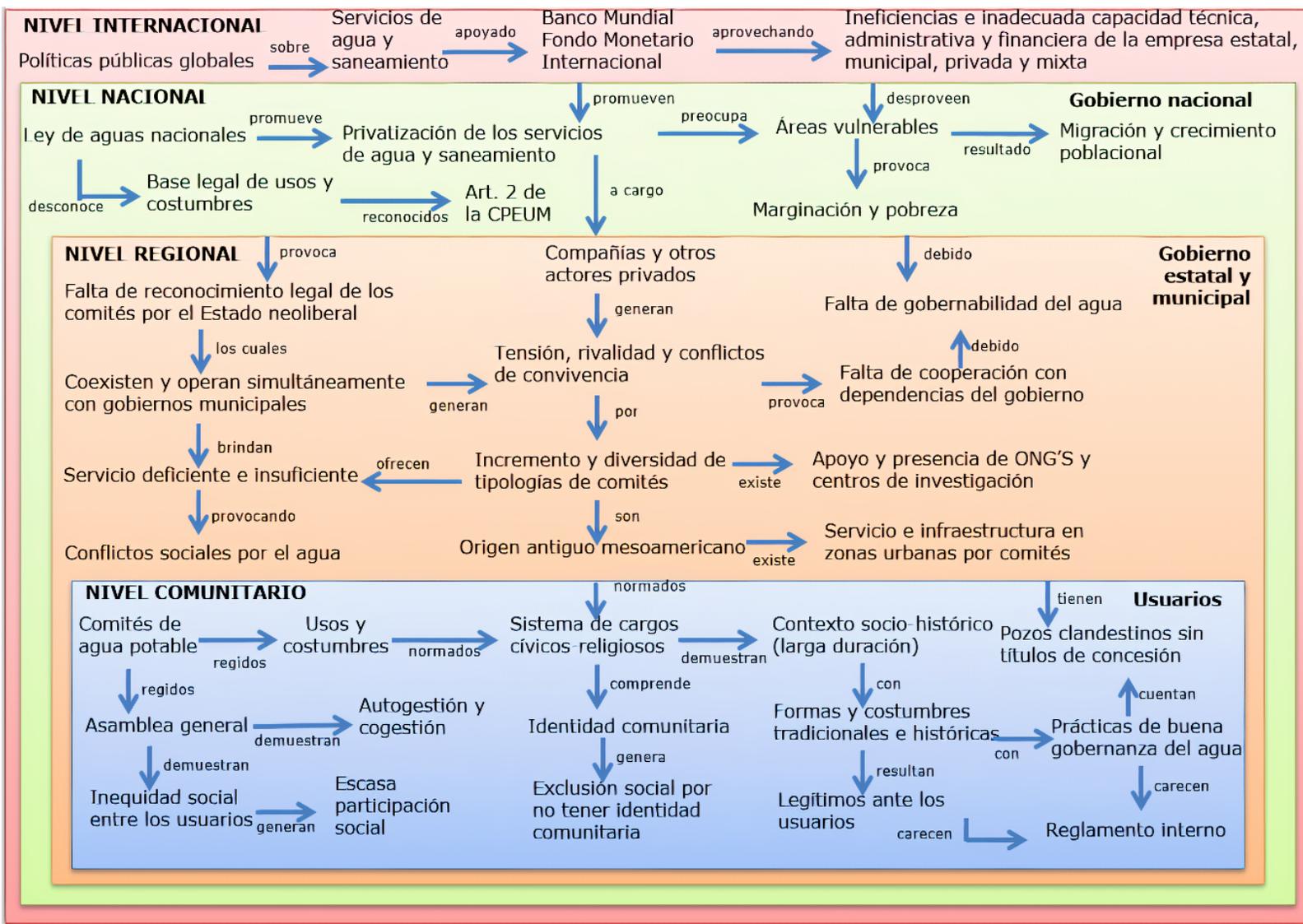


Figura 4. Modelo conceptual de los problemas críticos de los CAPT: AEPA sociopolítica. Fuente: elaboración de los autores con base en Anzurez (2020, p. 111).

Los problemas se conectaron entre ellos mismos por una palabra que refleja su relación; inicia desde el nivel internacional, con las agencias reguladoras del servicio de agua y saneamiento; después baja al nivel

nacional y regional, donde se encuentran los gobiernos (nacional, estatal, municipal) encargados del mismo servicio; y termina en el nivel comunitario, donde se encuentran los comités de agua potable.

Después de analizar la problemática por AEPA a través de los modelos conceptuales, se construyeron cuatro *matrices de importancia* (una por cada AEPA) para reducir el número de problemas y obtener el conjunto de factores críticos de éxito (FCE). Por el tamaño de las cuatro matrices no fue posible mostrarlas, pero en cada una de ellas se sumó el total de 1 en cada renglón y el total de 0 en cada columna. Finalmente, se sumaron ambos resultados para obtener la suma total de 0 y 1. De esta manera, se seleccionaron los 12 FCE (3 por cada AEPA) que obtuvieron mayor puntaje (Tabla 7).

Tabla 7. FCE clave prioritarios de los CAPT por AEPA.

ID	FCE clave prioritarios	FLOA	AEPA	Puntaje
FCE_1	Zonas con marginación y pobreza extrema	Amenaza	Sociopolítica	27
FCE_2	Ley de Aguas Nacionales	Amenaza	Sociopolítica	26
FCE_3	Falta de buena gobernabilidad del agua	Amenaza	Sociopolítica	26
FCE_4	Escasez de reglamentos internos para sancionar faltas de integridad	Limitación	Económica	20
FCE_5	Falta de mecanismos de transparencia y rendición de cuentas	Limitación	Económica	18
FCE_6	Tomas clandestinas y conexiones irregulares	Limitación	Económica	18
FCE_7	Contaminación de los acuíferos	Amenaza	Ambiental	16
FCE_8	Escasez de disponibilidad del agua	Amenaza	Ambiental	16
FCE_9	Cambio climático	Amenaza	Ambiental	16
FCE_10	Infraestructura hidráulica deficiente e insuficiente	Limitación	Técnico-operativa	18
FCE_11	Falta de asesorías y capacitación integral a los actores del comité	Limitación	Técnico-operativa	17
FCE_12	Escasez de datos e información confiable y precisa	Limitación	Técnico-operativa	16

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzurez (2020, p. 120).

Estos 12 FCE fueron modelados a través de 120 indicadores **FIPEIR** (con enfoque sistémico): 10 indicadores por cada FCE (2 de **Fi**, 2 de **P**, 2 de **E**, 2 de **I** y 2 de **R**), los cuales ayudaron a comprender y mejorar el

conocimiento de la red de relaciones causa-efecto del sistema de gestión de los CAPT (Anzures, 2020, pp. 129-140). Sin embargo, por cuestiones de espacio, solo se presentan cinco indicadores FiPEIR de cuatro FCE (un FCE por AEPA) (Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11).

Tabla 8. Indicadores FiPEIR del FCE_1: zonas con marginación y pobreza extrema (AEPA sociopolítica).

FiPEIR	Indicador	Definición	Unidad de medida / forma de calcularlo
Fi	Tasa de crecimiento demográfico	Crecimiento (o decrecimiento) porcentual de la población a lo largo de un año debido al aumento natural y a la migración	TCD (%)
P	Viviendas que no disponen de agua entubada	Porcentaje de viviendas particulares habitadas que no tienen disponibilidad de agua entubada en el ámbito de la vivienda en un año	$(\#Viviendas \text{ sin agua entubada }_i / \text{total de viviendas }_i) (100)$ donde i es la temporalidad
E	Conflictos sociopolíticos por el agua	Porcentaje de conflictos sociopolíticos por el agua (uso doméstico y público urbano) que son resueltos en un año (inconformidades, desacuerdos y exigencias sociales) en el municipio de Toluca	$(\#Conflictos \text{ sociopolíticos resueltos }_i / \#Conflictos \text{ sociopolíticos ocurridos }_i) (100)$ donde i es la temporalidad
I	Incidencia acumulada por causas hídricas	Porcentaje de habitantes que enferman en un año por causas de agua (escasez, abundancia, contaminación)	$(\#Personas \text{ enfermas por causas hídricas }_i / \text{total de población }_i) (10n)$ donde i es la temporalidad
R	Cobertura de agua potable	Crecimiento porcentual de la cobertura del servicio de agua en un año en el municipio de Toluca: organismo operador y los comités de agua	$(S_{ij} - S_{i(j-1)}) (100)$ donde S_i es el sistema de gestión, y j , la temporalidad

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020, p. 129).

Tabla 9. Indicadores FiPEIR del FCE_6: tomas clandestinas y conexiones irregulares (AEPA económica).

FiPEIR	Indicador	Definición	Unidad de medida / forma de calcularlo
Fi	Densidad de población	Número promedio de habitantes de un área urbana o rural en relación con la superficie total del territorio municipal	(#Hab/km ² _i - #Hab/km ² _{i-1}) (100) donde <i>i</i> es la temporalidad
P	Cultura del "no pago"	Porcentaje de usuarios que no pagan, o se encuentran detenidos y atrasados en sus pagos en un año	(#Usuarios que no pagan _i /total de usuarios _i) (100) donde <i>i</i> es la temporalidad
E	Situación financiera	Situación financiera en la que se encuentra el comité en un año en relación con los gastos y recaudación	(Total de ingresos _i - total de egresos _i) donde <i>i</i> es la temporalidad
I	Crecimiento de usuarios morosos	Incremento porcentual de usuarios morosos y rezagados en sus pagos en un año en relación con el año inmediato anterior	(#Usuarios morosos _i - #Usuarios morosos _{i-1}) (100) donde <i>i</i> es la temporalidad
R	Regularización de tomas de agua	Porcentaje de regularizaciones de tomas de agua clandestinas y conexiones irregulares en un año	(#Regularizaciones _i /total de inspecciones _i) (100) donde <i>i</i> es la temporalidad

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzurez (2020, p. 134).

Tabla 10. Indicadores FiPEIR del FCE_7: contaminación de los acuíferos (AEPA ambiental).

FiPEIR	Indicador	Definición	Unidad de medida / forma de calcularlo
Fi	Crecimiento urbano	Crecimiento porcentual del área urbana por el desarrollo económico, construcción de viviendas y edificaciones	$(\#Viviendas/km^2_i - \#Viviendas/km^2_{i-1}) (100)$ donde i es la temporalidad
P	Descarga de aguas residuales	Generación total de aguas residuales (descargas puntuales municipales e industriales) en cauces sin revestir sin previo tratamiento	$(Mm^3_i - m^3_{i-1}) (100)$ donde i es la temporalidad
E	Calidad del agua	Monitoreo sistemático de calidad del agua que permite detectar cambios en sus características habituales	$(ICA_i - ICA_{i-1}) (100)$ donde i es la temporalidad
I	Mortalidad por causas hídricas	Porcentaje de muertes por causas de agua en un año (escasez, abundancia, contaminación)	$(\#Muertes\ por\ causa\ hídrica_i / Total\ de\ población) (10n)$
R	Tratamiento de aguas residuales	Porcentaje de agua residual municipal e industrial que recibe tratamiento en relación con el agua generada en el territorio municipal	$(Mm^3_i - Mm^3_{i-1}) (100)$ donde i es la temporalidad

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020, p. 135)

Tabla 11. Indicadores FiPEIR del FCE_10: infraestructura hidráulica deficiente e insuficiente (AEPA Técnico-operativo).

FiPEIR	Indicador	Definición	Unidad de medida / forma de calcularlo
Fi	Tasa de crecimiento demográfico	Crecimiento (o decrecimiento) porcentual de la población a lo largo de un año debido al aumento natural y a la migración	TCD (%)
P	Insuficiencia financiera	Escasez de recursos económicos para mantenimiento, operación, rehabilitación y expansión de la infraestructura hidráulica en un año	(Total de ingresos i - total de egresos i) donde i es la temporalidad
E	Fugas de agua	Capacidad de respuesta para resolver el desperdicio de agua potable en las redes de distribución de agua entubada	(#Fugas de agua resueltas i / total de reportes i) (100) donde i es la temporalidad
I	Viviendas que no disponen de agua	Viviendas particulares habitadas que no tienen disponibilidad de agua, ya sea de llave pública, hidrante, otra vivienda, pipa, pozo, arroyo, lago	(#Viviendas sin agua i / total de viviendas i) (100) donde i es la temporalidad
R	Inversión en infraestructura hidráulica	Recursos económicos destinados al mantenimiento, rehabilitación y expansión de la infraestructura hidráulica en un año	(\$ i) donde i es la temporalidad

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020, p. 138).

El conjunto de 120 indicadores FiPEIR fue reducido bajo el *análisis estructural de sistemas*, mediante la matriz de impactos cruzados, con la cual se simplificó la complejidad del sistema de gestión de los CAPT, para encontrar los *indicadores clave prioritarios*.

El procesamiento de la matriz de influencia directa (MID) de 0 y 1, a la 7^a potencia en el *software* MoSoPEP-GIRH&CMI, permitió la detección de 52 *indicadores clave prioritarios* (34 de enlace, 16 motrices y 2 resultantes), de los cuales 24 indicadores clave (19 de enlace y 5 motrices) correspondieron a la AEPA económica; 19 (10 de enlace, 8 motrices y 1 resultante), a la AEPA técnico-operativa; y 9 (5 de enlace, 3 motrices y 1 resultante), a la AEPA sociopolítica. Los indicadores de la AEPA ambiental fueron descartados, ya que se ubicaron en los cuadrantes de indicadores *excluidos* y *del pelotón* (Figura 5).

Plano de Influencia/Dependencia Directa

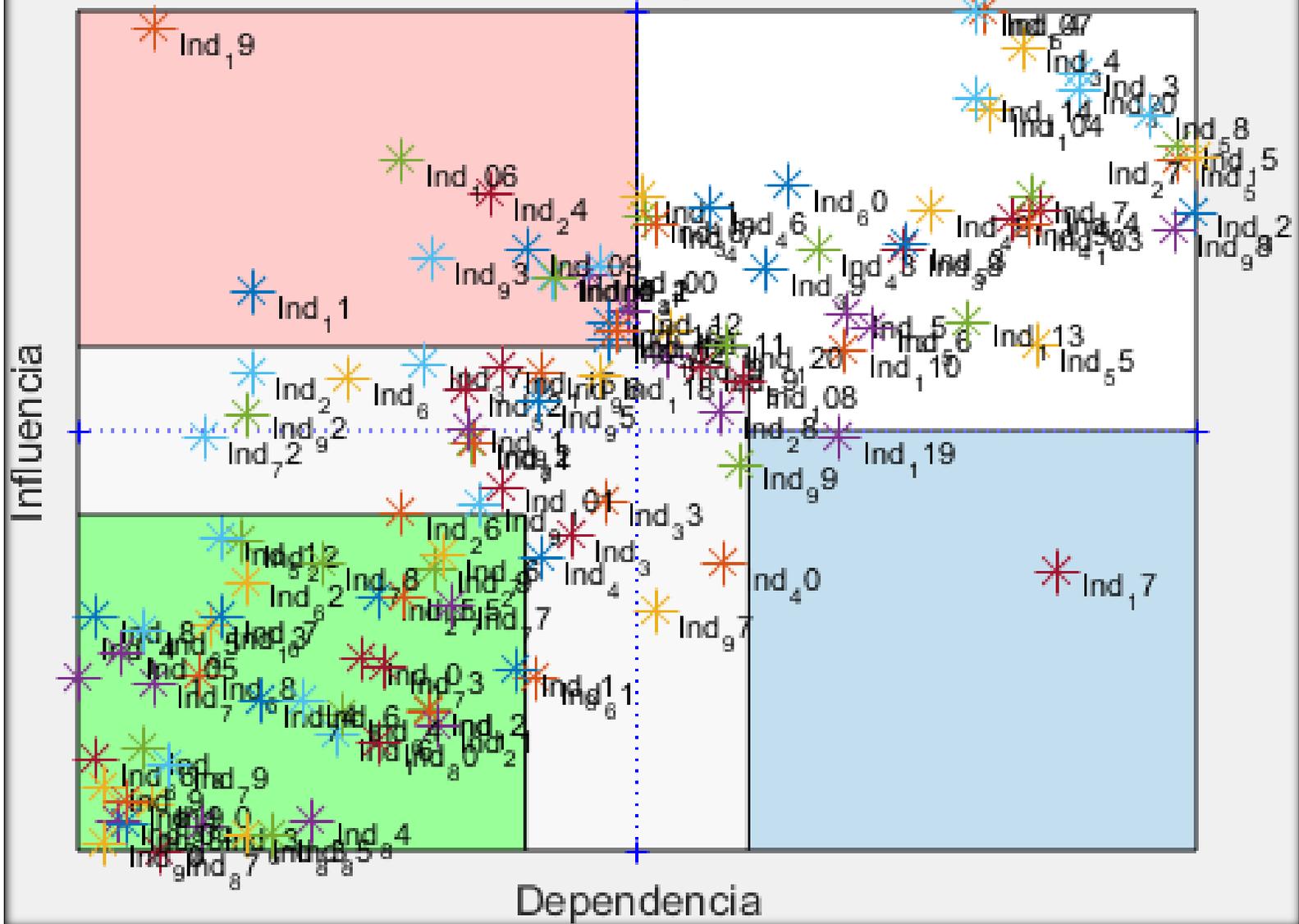


Figura 5. Plano de influencia total del sistema de gestión de los CAPT.
Fuente: elaboración de los autores con base en Anzurez (2020, p 155).

Los 52 indicadores clave prioritarios fueron aquellos más influyentes y más dependientes ubicados gráficamente en el plano de influencia total,

dentro de los cuadrantes de indicadores *motrices, de enlace y resultantes*. Los indicadores ubicados en los cuadrantes de indicadores *excluidos y del pelotón* fueron descartados, pues no estuvieron claramente definidos, tampoco ejercieron influencia ni dependencia sobre el resto del sistema (Manzano, 2017, p. 151) (Tabla 12).

Tabla 12. Indicadores clave prioritarios del sistema de gestión de los CAPT por AEPA, categoría del indicador y nivel de influencia.

Id	Número del indicador	Nombre del indicador	FIPEIR	AEPA	Categoría del indicador	Nivel de influencia
1	107	Ineficiencia técnica-operativa de los actores del comité	I	Técnico-operativa	Enlace	114.80
2	54	Ineficiencia administrativa del comité	P	Económica	Enlace	114.75
3	19	Regularizaciones de actores-grupos de interés informales	R	Sociopolítica	Motrices	112.23
4	34	Voluntariedad de los actores del comité para realizar asambleas	P	Económica	Enlace	109.76
5	23	Gestión colaborativa del agua	P	Sociopolítica	Enlace	106.40
6	30	Incorporación de los usuarios	R	Sociopolítica	Enlace	104.15

Id	Número del indicador	Nombre del indicador	FiPEIR	AEPA	Categoría del indicador	Nivel de influencia
7	114	Voluntariedad de los actores para generar datos e información	P	Técnico-operativa	Enlace	103.02
8	104	Voluntariedad de los actores del comité para recibir capacitación integral	P	Técnico-operativa	Enlace	101.19
9	58	Conflictividad socioeconómica	I	Económica	Enlace	100.73
10	15	Conflictos sociales por cambios a la legislación vigente de aguas	E	Sociopolítica	Enlace	96.49
11	27	Conflictividad sociopolítica con el sector gubernamental	I	Sociopolítica	Enlace	94.76
12	5	Conflictos sociales por el agua en áreas vulnerables	E	Sociopolítica	Enlace	94.40
13	106	Profesionalización del comité	E	Técnico-operativa	Motrices	94.37
14	60	Regularización de tomas clandestinas	R	Económica	Enlace	90.94
15	24	Corrupción en el sector agua	P	Sociopolítica	Motrices	89.85
16	41	Transparencia y acceso a la información	Fi	Económica	Enlace	89.57

Id	Número del indicador	Nombre del indicador	FiPEIR	AEPA	Categoría del indicador	Nivel de influencia
17	57	Insuficiencia financiera por tomas clandestinas	I	Económica	Enlace	89.47
18	46	Desinformación de los usuarios	E	Económica	Enlace	87.95
19	94	Insuficiencia financiera para infraestructura hidráulica	P	Técnico-operativa	Enlace	87.72
20	48	Situación financiera del comité	I	Económica	Enlace	87.59
21	32	Gobernanza hídrica del comité	Fi	Económica	Enlace	87.32
22	36	Corrupción de los actores del comité	E	Económica	Enlace	86.84
23	45	Confianza económica de los usuarios	E	Económica	Enlace	86.46
24	47	Opacidad de la información sobre el manejo financiero del comité	I	Económica	Enlace	85.97
25	103	Insuficientes recursos económicos para la capacitación integral de los actores	P	Técnico-operativa	Enlace	85.73
26	98	Conflictos sociales por deficiencias en el servicio de agua	I	Técnico-operativa	Enlace	84.85

Id	Número del indicador	Nombre del indicador	FiPEIR	AEPA	Categoría del indicador	Nivel de influencia
27	53	Cultura socioeconómica del "no pago"	P	Económica	Enlace	82.98
28	109	Capacitación integral de los actores del comité	R	Técnico-operativa	Motrices	82.35
29	38	Uso inadecuado de recursos económicos	I	Económica	Enlace	82.35
30	43	Participación social en asambleas	P	Económica	Enlace	82.35
31	93	Desconocimiento técnico-operativo de los actores del comité	P	Técnico-operativa	Motrices	81.21
32	100	Capacitación técnico-operativa de los actores del comité	R	Técnico-operativa	Motrices	80.06
33	39	Elaboración de reglamentos internos del comité	R	Económica	Enlace	79.64
34	42	Rendición de cuentas de los actores del comité	Fi	Económica	Motrices	78.96
35	31	Integridad de los actores del comité	Fi	Económica	Motrices	78.90
36	50	Participación de usuarios en los cortes de caja	R	Económica	Motrices	78.65
37	44	Asambleas generales	P	Económica	Motrices	78.64

Id	Número del indicador	Nombre del indicador	FiPEIR	AEPA	Categoría del indicador	Nivel de influencia
38	11	Marco regulatorio en materia de agua adaptada a la GIRH	Fi	Sociopolítica	Motrices	76.58
39	112	Conocimiento e información compartida intersectorialmente	Fi	Técnico-operativa	Motrices	74.14
40	35	Usuarios morosos	E	Económica	Enlace	73.78
41	116	Desactualización de datos e información	E	Técnico-operativa	Motrices	72.66
42	113	Insuficiencia financiera para equipamiento y mobiliario de oficina	P	Técnico-operativa	Enlace	72.53
43	56	Crecimiento de usuarios morosos	E	Económica	Enlace	71.78
44	111	Transparencia y acceso a la información técnico-operativa	Fi	Técnico-operativa	Enlace	71.46
45	117	Opacidad de la información y datos	I	Técnico-operativa	Motrices	71.31
46	102	Conocimiento e información	Fi	Técnico-operativa	Motrices	70.27
47	120	Generación de información y datos confiables y precisos	R	Técnico-operativa	Enlace	69.48
48	55	Recaudación económica	E	Económica	Enlace	69.47

Id	Número del indicador	Nombre del indicador	FiPEIR	AEPA	Categoría del indicador	Nivel de influencia
49	110	Inversión en asesorías y capacitación integral de los actores	R	Técnico-operativa	Enlace	68.53
50	37	Impunidad	I	Económica	Motrices	66.89
51	119	Inversión en infraestructura, equipamiento y mobiliario	R	Técnico-operativa	Resultantes	56.84
52	17	Comités sin personalidad jurídica que prestan servicios de agua sin títulos de concesión	I	Sociopolítica	Resultantes	38.80

Fuente: elaboración de los autores con base en Anzures (2020, p. 156).

Cabe destacar que esta lista de 52 indicadores clave no es definitiva, sino que puede ser simplificada si se decide trabajar con un grupo de indicadores (de enlace, motrices) o seleccionar aquellos indicadores con mayor nivel de influencia.

El mayor número de indicadores clave pertenecieron a la AEPA económica (24 indicadores), lo que indicó ser la AEPA con mayor peso y mayor nivel de influencia (46.4 %) en el sistema de gestión de los CAPT. Después quedó la AEPA técnico-operativa con 19 indicadores clave y 35.1 % de influencia en el sistema; finalmente, la AEPA sociopolítica, con 9 indicadores clave y con menor nivel de influencia en el sistema de gestión de los CAPT (18.5 %).

Discusión

En este trabajo se tomó la decisión de analizar y priorizar la problemática hídrica de los 27 CAPT, los cuales se identificaron como aquellos comités de origen étnico (otomíes) incorporados a la estructura social de origen antiguo: *el sistema de cargos cívico-religioso*, regido por los usos y costumbres ejercidos a través del derecho consuetudinario. Estos CAPT cuentan con una tradición histórica de gobernanza y autogestión en el manejo del agua, localizados en comunidades originarias, las cuales comparten características similares de identidad comunitaria, origen sociohistórico, asamblea general, cargos honoríficos, estructura, organización, funcionamiento.

Al principio de la investigación, se pensaba estudiar los problemas de los comités de agua de la república mexicana, porque se creía que los problemas en la gestión comunitaria del agua eran homogéneos, pero se identificaron diferencias políticas, legislativas y administrativas en cada entidad federativa, donde en algunos estados (Chiapas, Oaxaca, Morelos, Chihuahua, Guanajuato, San Luis Potosí, Tabasco) sí han modificado su legislación de aguas, y han reconocido y aceptado formalmente a los comités, mientras que otros no (México, Puebla, Nuevo León, Jalisco). A lo anterior, se añadieron los cambios territoriales provocados por trasvases de agua, industrialización, crecimiento poblacional, demanda de servicios públicos, cambios religiosos, cambios de actividades económicas, movimientos de mercado, los cuales agravan aún más los problemas de los comités, y modifican la gestión colaborativa y la gobernabilidad efectiva del agua.

Lo anterior orilló a delimitar la zona de estudio a menor escala (Estado de México, cuenca hidrosocial), pero aun así se identificó una gran cantidad y variedad de comités (antiguos, de reciente creación, formales, ilegales, mixtos, especiales), al igual que diferencias en relación con sus fuentes de agua (pozos de extracción, manantiales, ramal de los sistemas Lerma y Cutzamala, pipas de agua); disponibilidad de agua (escasez o abundancia); y tipos de tenencias de la tierra (ejidal, comunal, agrícola y ganadera, pequeña propiedad), entre otras.

A pesar de que los CAPT comparten características similares, también se identificaron diferentes problemas al interior de ellos, como en sus relaciones mayores con el Estado. Se pensaba que el principal problema de estos comités era la falta de reconocimiento legal ante el Estado, como lo señalan diferentes estudios sobre gestión comunitaria (Giménez & Palerm, 2007; Galindo & Palerm, 2007; López *et al.*, 2013; Becerril-Tinoco & De Alba-Murrieta, 2014; Díaz, 2014; Escobar, 2015; Bastian & Vargas, 2015; Vargas, 2015), pero al ser el análisis por procesos sistémicos, se derivaron otros problemas (internos y externos) de mayor prioridad.

En este sentido, los problemas críticos (FCE) encontrados en las AEPA económica y técnico-operativa, según su condición FLOA, fueron aspectos internos de los CAPT (*limitaciones*), que afectan negativamente su organización y funcionamiento, ya que provienen de la gestión comunitaria, y son competencia exclusiva de ellos mismos a través de la autogestión, las buenas prácticas de gobernanza y la toma de decisiones en las asambleas generales: 1) escasez de reglamentos internos para sancionar faltas de integridad; 2) falta de mecanismos de transparencia y rendición de cuentas; 3) tomas clandestinas y conexiones irregulares;

4) infraestructura hidráulica deficiente e insuficiente; 5) falta de asesorías y capacitación integral a los actores del comité, y 6) escasez de datos, y de información confiable y precisa.

Por otra parte, los problemas críticos (FCE) encontrados en las AEPAs sociopolítica y ambiental, según su condición FLOA, fueron aspectos externos de los CAPT (*amenazas*) que afectan negativamente su organización y funcionamiento interno, porque provienen del exterior: 1) zonas con marginación y pobreza extrema; 2) Ley de Aguas Nacionales; 3) falta de buena gobernabilidad del agua; 4) contaminación de los acuíferos; 5) falta de disponibilidad del agua, y 6) cambio climático. Estos problemas son ajenos a los CAPT y son competencia exclusiva de los gobiernos (nacional, estatal y municipal) a través de las políticas públicas ambientales y la legislación en materia de aguas.

En relación con los 120 indicadores FIPEIR (10 por cada FCE) que modelan a los 12 FCE, es posible que el planteamiento de algunos de ellos en términos cuantitativos y/o cualitativos no estuvieron perfeccionados y tampoco cumplieron con las características que deben cumplir los indicadores FIPEIR, pues a pesar del trabajo de campo y del análisis de gabinete realizado por varios años (2013-2019) sobre organización social y gobernanza del agua, no se poseen los datos e información suficiente para plantear y calcular los indicadores de manera definitiva. A lo anterior se añadió la ausencia de datos e información estadística en fuentes oficiales (sistema de información de agua, sistema estatal de agua, organismo de agua y saneamiento de Toluca), que dificultaron aún más plantear y calcular los indicadores.

La ausencia de datos e información gubernamental y de campo orilló a analizar e identificar los indicadores clave con base en la consulta con “expertos” de conocimiento local bajo la *técnica de grupo Delphi*, obteniéndose la definición de los indicadores y la evaluación de las relaciones. Se analizaron 14 280 relaciones entre pares de indicadores (120 por 120), lo cual resultó ser un proceso analítico y minucioso debido a la gran cantidad de relaciones. De esta manera, se hizo el llenado de la matriz de impactos cruzados. Sin embargo, dicha técnica de consulta no puede reemplazar a la información obtenida con trabajo de campo, pues los “expertos” (se notó y era evidente) desconocían varios temas sobre la identificación y evaluación de indicadores como para que pudieran ser debidamente reflexionados, analizados, discutidos y decididos con diferentes actores-grupos de interés del sector público, social y privado. Asimismo, se detectaron graves dificultades en la realización de talleres participativos (mesas de trabajo), como lo establece la metodología PEP-GIRH, como ausencias, participación limitada, actores comunitarios poco representativos y, viceversa, alta presencia del sector gubernamental, todo lo cual hizo fracasar dicha técnica de talleres.

Los resultados de la metodología anterior dieron por lo tanto un sesgo en la información y evaluación de las relaciones entre pares de indicadores debido a que no fue posible realizarlo cómo exige la metodología PEP-GIRH, lo cual probablemente sea muy difícil o imposible. Sin embargo, se considera que para lograr una visión común y construir consensos en torno a la problemática hídrica de los CAPT, es necesario eliminar la propuesta de los talleres participativos y aumentar el tiempo de trabajo de campo con todos los actores hídricos, a fin de garantizar su

visión dentro del estudio y para la definición de indicadores en todas las etapas del proceso PEP-GIRH.

A pesar de los anteriores inconvenientes, se lograron obtener 52 indicadores clave (34 de enlace, 16 motrices y 2 resultantes) que representaron los *elementos esenciales que deben ser considerados y atendidos en la identificación de estrategias de gobernanza e integridad para resolver la problemática hídrica de los CAPT*. En este sentido, las acciones y alternativas de solución obedecerán a los indicadores clave prioritarios para mejorar el sistema de gestión de los CAPT y preservar el recurso hídrico.

Los indicadores de enlace que tuvieron mayor nivel de influencia sobre otros indicadores, pero que también recibieron mucha influencia de otros de forma directa o indirecta, fueron:

1. AEPA económica: ineficiencia administrativa del comité; voluntariedad de los actores del comité para realizar asambleas; conflictividad socioeconómica; regularización de tomas clandestinas.
2. AEPA técnico-operativa: ineficiencia técnico-operativa de los actores del comité; voluntariedad para generar datos e información; voluntariedad para recibir capacitación integral.
3. AEPA sociopolítica: gestión colaborativa del agua; incorporación de los usuarios; conflictos sociales por cambios a la legislación vigente de aguas; conflictividad sociopolítica con el sector gubernamental; conflictos sociales por el agua en áreas vulnerables.

Estos indicadores de enlace se relacionaron con la falta de capacidades y habilidades de los actores, así como con la falta de recursos humanos en los comités que impiden desempeñar un trabajo eficiente y efectivo en

sus organizaciones y sistemas de agua. Toda acción sobre estos indicadores tendrá repercusiones sobre los demás y sobre ellos mismos por un efecto de retorno que potencia o reduce su impulso inicial.

Los indicadores motrices que influyeron mucho sobre otros indicadores, pero que al mismo tiempo pocos influyeron sobre ellos (poca dependencia) fueron los siguientes:

1. AEPA sociopolítica: regularizaciones de actores-grupos de interés informales.
2. AEPA técnico-operativa: profesionalización del comité; capacitación integral de los actores del comité.

Estos indicadores motrices fueron determinantes e impulsaron la dinámica del resto del sistema. La regularización de los actores informales se relacionó con la necesidad del reconocimiento jurídico de los comités en la legislación nacional y estatal vigente en materia de aguas, para lograr su funcionamiento formal y garantizar el derecho humano al agua.

Si bien la profesionalización y capacitación integral de los actores fueron indicadores motrices para mejorar el funcionamiento y administración de los CAPT, se identificó que en las comunidades originarias tienen mayor relevancia los valores cívicos —individuales y colectivos— de los actores y usuarios, como la honestidad, la responsabilidad, el respeto y la confianza, que se promueven a través de buenas prácticas de gobernanza del agua, es decir, con la transparencia, rendición de cuentas, cooperación, equidad, democracia y participación voluntaria de los usuarios en la toma de decisiones.

A partir de los resultados encontrados en el proceso metodológico PEP-GIRH, se podrán formular acciones y alternativas de solución por orden

de prioridad o grupo de indicadores. Sin embargo, aunque el presente artículo se limitó a la etapa de análisis del proceso PEP-GIRH (análisis de la problemática, identificación de problemas críticos, identificación de indicadores clave), se prevé la elaboración de un siguiente artículo, donde se propongan las acciones y alternativas de solución por AEPA o grupo de indicadores, y se realice la propuesta de un modelo ideal de gestión comunitaria para los comités de agua potable de Toluca.

Conclusiones

La base teórica científica con la definición de sus conceptos operativos (teórico-metodológicos) fue fundamental para la comprensión e interpretación de los datos y la información obtenida con el procedimiento PEP-GIRH, lo cual facilitó la identificación, análisis y priorización de la problemática hídrica de los 27 CAPT.

El enfoque teórico de la gestión comunitaria del agua (sociohistórico, bienes comunes y cogestión) permitió entender y analizar los procesos y relaciones sociopolíticas, culturales e históricas que dieron origen a los CAPT, e identificar sus características esenciales para tener mayor certeza en el procesamiento de las matrices de datos.

El trabajo de campo (entrevistas con informantes clave) y el trabajo participativo (conocimiento empírico-práctico) fueron instrumentos fundamentales para el análisis, obtención e interpretación de los datos e información de los CAPT. No así los talleres y la técnica de grupo de consulta Delphi, los cuales presentaron inconsistencias e insuficiencias para plantear y calcular los indicadores de manera definitiva.

Si bien esta metodología contiene aportes importantes al identificar, analizar y priorizar la problemática hídrica de los CAPT, también se han identificado limitantes en dicho proceso, donde *la participación conjunta de actores en un grupo de trabajo* —conformado por usuarios del nivel comunitario (campesinos, indígenas, ejidatarios), y actores del sector público (gobierno estatal y municipal) y privado (industrias)— es muy escasa en el enfoque participativo, faltando mucho trabajo en la voluntariedad de la gente.

A pesar de todo, el proceso metodológico PEP-GIRH demostró ser eficaz para identificar y priorizar la problemática hídrica de los 27 CAPT con enfoque integrado. Todas sus etapas conllevaron a un análisis de la situación, que permitió identificar y mejorar el conocimiento del sistema a través de las matrices de datos. Los resultados obtenidos a través de dicho proceso fueron vinculantes con la estructura social de los 27 CAPT, y ofrecieron elementos clave (económicos, sociopolíticos y técnico-operativos) de gran utilidad operativa para ellos, los cuales pueden ser considerados para la identificación de acciones específicas, y mejorar la participación y la toma de decisiones en la gobernanza y la gobernabilidad hídrica de sus comunidades.

Agradecimientos

Al Programa Investigadoras e Investigadores del Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (Comecyt Edomés) por el apoyo otorgado para la realización de una cátedra en la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Referencias

- Aguilar, E. (2011). *Gestión comunitaria de los servicios de agua y saneamiento: su posible aplicación en México*. Recuperado de http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/26079/S2011150_es.pdf?sequence=1
- Ampuero, R., Faysse, N., & Quiroz, F. (2005). *Metodología de apoyo a comités de agua potable en zonas peri-urbanas. Diagnóstico integrado para el mejoramiento de la gestión y visión al futuro*. Proyecto NEGOWAT, Centro AGUA-CERES. Cochabamba, Bolivia. Recuperado de <http://agritrop.cirad.fr/559443/>
- Anzures, E. (2016). *Procesos de gobernanza en el municipio de Toluca. Comparación de la gestión del servicio de agua potable: organismo operador y comités comunitarios* (tesis de maestría). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.
- Anzures, E. (2020). *Diseño táctico integrado de un comité comunitario de agua para la gobernanza e integridad con enfoque de GIRH* (tesis de doctorado). Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA-UAEMéx), Toluca, México.
- Bastian, Á., & Vargas, S. (2015). Entre la ley y la costumbre. Sistemas normativos y gestión comunitaria del agua en Tetela del Volcán, Morelos. *Entre Diversidades*, 1(5), 45-73. Recuperado de <http://entrediversidades.unach.mx/index.php/entrediversidades/article/view/57/119>

- Becerril-Tinoco, C., & De Alba-Murrieta, F. (2014). Construcción de comunidades hídras en México. *Territorios* (30), 171-189. DOI: 10.12804/territ30.2014.08
- Bernal, E. (2017). *Propuesta para el análisis de la gobernanza del agua en una cuenca hidrosocial: caso Valle de Bravo-Amanalco* (tesis de doctorado). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.
- Bolaños, R., Toledo, D., & Osorno, C. (s.f.). Corrupción en el sector agua: ¿Quién es responsable de la crisis? *Ethos Laboratorio de políticas públicas*. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Recuperado de <https://ethos.org.mx/wp-content/uploads/2019/10/Corrupci%C3%B3n-en-el-sector-agua-qui%C3%A9n-es-responsable-de-la-crisis.pdf>
- Cadena, C., & Salgado, L. (2017). Redes y capacidades de actores en torno a comités independientes de agua potable: el caso de San Felipe Tlalmimilolpan, Toluca, México. *Revista de El Colegio de San Luis*, 7(13), 62. DOI: 10.21696/rcsl7132017635
- Cadena, C., & Morales, M. (2020). Conflictos entre ayuntamiento y comités independientes en Toluca por la gobernanza del agua. *Carta Económica Regional*, (127), 25-53. DOI: 10.32870/cer.v0i127.7790
- Campuzano, J. (2015). *AEPA social en la GIRH conceptualización y jerarquización con análisis multicriterio: caso Toluca de Lerdo* (tesis de doctorado). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.

- Campuzano, J. (2019). Sistema de cargos y manejo de agua potable en los comités de Toluca de Lerdo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(1), 52-84. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-01-03
- CPEUM, Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (2014). *Últimas reformas publicada DOF 07-07-2014*. Recuperado de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>
- Díaz-Delgado, C., Esteller, M., Velasco-Chilpa, A., Martínez-Vilchis, J., Arriaga-Jordán, C., Vilchis-Francés, A. et al. (2009). *Guía de planeación estratégica participativa para la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago*. Toluca, México: Red Interinstitucional e Interdisciplinaria de Investigación y coordinación científica para la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago (Red Lerma), Universidad Autónoma del Estado de México. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277405521_Guia_de_Planeacion_Estrategica_Participativa_para_la_Gestion_Integrada_de_Recursos_Hidricos_de_la_Cuenca_Lerma-Chapala-Santiago_Capitulo_Estado_de_Mexico
- Díaz-Delgado, C., Romero, A., Mastachi, C., Salinas, H., Gómez, M., Esteller, M. et al. (22-25 de marzo, 2017). *Propuesta metodológica para la construcción del plan táctico GIRH en una cuenca*. XXIV Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México.

- Díaz, M. (2014). *Relaciones de poder en la gestión comunitaria del agua; el territorio y lo social como fuerzas* (tesis de maestría). Facultad Latinoamericana de Ciencias Socialesm FLACSO-México. Recuperado de <https://flacso.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1026/25>
- Estrada, J. (2003). *Introducción de agua y drenaje. El caso del programa Seguimos en Acción de Toluca de Lerdo, 2000-2002* (tesis de maestría). El Colegio Mexiquense, Toluca, México.
- Estrada, A., & Franco, H. (diciembre, 2004). Entre la ley y la costumbre: el uso y manejo del agua potable en el municipio de Temoaya, Estado de México. *Páramo del Campo y la Ciudad* (7), 123-132. Centro de Estudios sobre Marginación y Pobreza del Estado de México, Toluca, México.
- Escobar, C. (2015). *La asamblea comunitaria en Tlaxcala como eje de la gestión del agua: una experiencia de gobernanza colaborativa* (tesis de doctorado). Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO-México. Recuperado de <https://flacso.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1026/80>
- Galindo, E., & Palerm, J. (2007). Pequeños sistemas de agua potable: entre la autogestión y el manejo municipal en el estado de Hidalgo, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 4(2), 127-146. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v4n2/v4n2a3.pdf>

- Galindo, E., & Palerm, J. (2012). Toma de decisiones y situación financiera en pequeños sistemas de agua potable: dos casos de estudio en El Cardonal, Hidalgo, México. *Región y Sociedad*, 24 (54). DOI: 10.22198/rys.2012.54.a155
- Galindo, E., & Palerm, J. (2016). Sistemas de agua potable rurales. Instituciones, organizaciones, gobierno, administración y legitimidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(2), 17-34. Recuperado de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1137>
- García, M. (2016). *Propuesta para la gestión intermunicipal de la cuenca hidrosocial presa huapango* (tesis de doctorado). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.
- Giménez, M., & Palerm, J. (2007). Organizaciones tradicionales de gestión del agua: importancia de su reconocimiento legal para su pervivencia. El caso de España. *Región y Sociedad*, 19(38), 3-24. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/regsoc/v19n38/v19n38a1.pdf>
- Godet, M. (1993). *De la anticipación a la acción: manual de prospectiva y estrategia*. Barcelona, España: Marcombo, S. A. Recuperado de <https://administracion.uexternado.edu.co/matdi/clap/De%20la%20anticipaci%C3%B3n%20a%20la%20acci%C3%B3n.pdf>

- Godet, M., & Durance, P. (2011). *La prospectiva estratégica para las empresas y los territorios*. Recuperado de <http://mastor.cl/blog/wp-content/uploads/2011/12/La-prospectiva-estrategica.-Godet.-Unesco-2011.pdf>
- Gómez, B. (2016). *Género, mujer y agua: un análisis desde la gobernanza en los comités de agua potable de Toluca* (tesis de maestría). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMex), Toluca, México.
- Gómez, B., Romero, A., & Vizcarra, I. (2017). Visibilización de la participación femenina en los Comités Comunitarios de Agua Potable de Toluca, Estado de México. *Sociedad y Ambiente* (15), 67-92. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455753347004>
- Gutiérrez, V., Nazar, D., Zapata, E., Contreras, J., & Salvatierra, B. (2013). Mujeres y organización social en la gestión del agua para consumo humano y uso doméstico en Berriozabal, Chiapas. *LiminaR. Estudios Sociales y Humanísticos*, 11(2), 100-113. Recuperado de <https://liminar.cesmeca.mx/index.php/r1/article/view/225/207>
- Hernández, M. (2016). *Planificación hídrica y gobernanza del agua: su implementación en la subcuenca hidrográfica del río Amecameca, Valle de México* (tesis de maestría). El Colegio de la Frontera Norte, Monterrey, México. Recuperado de <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Hern%C3%A1ndez-Cruz-Mois%C3%A9s-Gerardo.pdf>

- Hinojosa-Peña, A., Romero-Contreras, A. T., & Hernández-Téllez, M. (2013). Gestión local del agua del Qanat de Tlalmanalco, Estado de México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 41-56. Recuperado de <https://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v9-n1-6-gestion-local-del-agua-del-qanat-de-tlalmanalco-estado-de-mexico.pdf>
- Hinojosa, A. (2014). *Estudio comparativo de gestión del agua entre el derecho consuetudinario y la ley en qanats* (tesis de doctorado). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.
- Korsback, L. (2009). El desarrollo del sistema de cargos de San Juan Chamula: el modelo teórico de Gonzalo Aguirre Beltrán y datos empíricos. *Anales de Antropología*, 24(1), 215-242. DOI: 10.22201/iaa.24486221e.1987.1.10005
- López, S., Martínez, T., & Palerm, J. (2013). Las comunidades en la administración de sistemas de agua potable. Región de los Volcanes, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(1), 39-58. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S18705472201300010003&script=sci_arttext&tIng=pt
- Manzano, L. (2007). *Diseño de base de geodatos censales demográficos e implementación geomática de indicadores e índices hídricos* (tesis de maestría). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.

- Manzano, L. (2017). *Modelo hidrogeomático de indicadores sistémicos para la gestión integrada de recursos hídricos* (tesis de doctorado). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.
- Ostrom, E. (2000). *El gobierno de los bienes comunes: la evolución de las instituciones de acción colectiva*. México, DF: Fondo de Cultura Económica.
- Pimentel, J., Velázquez, M., & Palem, J. (2012). Capacidades locales y de gestión social para el abasto de agua doméstica en comunidades rurales del Valle de Zamora, Michoacán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 9(2), 107-121. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722012000200002&script=sci_arttext
- Ramírez, J. (2020). *Caracterización de la gobernanza y gobernabilidad de los comités de agua potable en situación especial dentro de los sistemas Cutzamala y Lerma* (tesis de maestría). Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA-UAEMéx), Toluca, México.
- Romero, A., Díaz, C., Martínez, T., Gómez, M. Á., Hernández, M., Alberich, M. E., Mastachi, C. A., Hinojosa, A., & Becerril, R. (2015). *La antropología en la planificación regional como elemento para la gestión integrada de los recursos hídricos*. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/59261>

- Sandoval, A. (septiembre-diciembre, 2011). Entre el manejo comunitario y gubernamental del agua en la Ciénega de Chapala, Michoacán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 8(3), 367-385. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v8n3/v8n3a4.pdf>
- Sandoval, A., & Griselda, M. (mayo-agosto, 2013). La gestión comunitaria del agua en México y Ecuador: otros acercamientos a la sustentabilidad. *Ra Ximhai*, 9(2), 165-179. Recuperado de <http://revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/53968>
- Vargas, S. (julio, 2015). *Contradicciones entre la gestión social y la gestión municipal del agua*. Asociación Mexicana de Ciencias Políticas, gobiernos locales, municipales, regionales y estatales. Simposio llevado a cabo en el III Congreso Internacional de Ciencias Políticas, Jalisco, México. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/282673344_CONTRADICCIONES_ENTRE_LA_GESTION_SOCIAL_Y_LA_GESTION_MUNICIPAL_DEL_AGUA
- WGF, Water Governance Facility. (2009). *Manual de capacitación sobre la integridad del agua*. Recuperado de http://www.waterintegritynetwork.net/wp-content/uploads/2015/03/WI-TrainingManual_ES.pdf
- Zepeda, F. (2017). *El cuadro de mando integral como herramienta para la implementación, seguimiento y evaluación de los recursos hídricos* (tesis de doctorado). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.

Zepeda, F. (2012). *Diseño e implementación de un módulo informático de apoyo a la planeación estratégica participativa (PEP), aplicado a la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH)* (tesis de maestría). Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMéx), Toluca, México.

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-02

Artículos

Modelación numérica del flujo rasante en un canal escalonado con curvas verticales

Numerical modeling of skimming flow in a stepped channel with vertical curves

Daniel López-de-Mesa¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7577-5527>

Andrés Felipe Cuervo², ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9192-6964>

Alejandra Balaguera³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4552-513X>

¹Universidad de Medellín, Facultad de Ingeniería, Antioquia, Colombia, dlopez@udemedellin.edu.co

²Universidad de Medellín, Facultad de Ingeniería, Antioquia, Colombia, afcuervov@gmail.com

³Universidad de Medellín, Facultad de Ingeniería, Antioquia, Colombia, abalaguera@udemedellin.edu.co

Autor para correspondencia: Daniel López-de-Mesa, dlopez@udemedellin.edu.co



Resumen

Los canales escalonados se utilizan frecuentemente para la descarga de agua en embalses, sin embargo, hay pocos estudios que consideren la implementación de curvas en el fondo de este tipo de estructuras. Este artículo presenta una evaluación cuantitativa, mediante modelación numérica con dinámica de fluidos computacional (CFD), de las propiedades del flujo rasante en canales escalonados de alta pendiente con curvas verticales. La geometría escalonada se definió con una curva convexa a la entrada, una rampa recta intermedia y una curva cóncava a la salida, con el fin de comparar los campos de velocidad, presión, vorticidad y estadísticas de la turbulencia en los tres tramos del canal. Se concluyó que los perfiles de velocidad obtenidos con el modelo de turbulencia RNG $k-\epsilon$ presentaron una buena correlación con mediciones experimentales en la zona de flujo no aireada. Sin embargo, la calidad del ajuste disminuyó aguas abajo, ya que el modelo numérico no capturó el fenómeno de aireación. Al comparar el comportamiento hidrodinámico en ambas curvas escalonadas se encontró que la zona de separación abarcó una mayor fracción de cada escalón en la curva convexa. En ésta se presentaron además valores negativos de presión a la altura de la esquina superior de las contrahuellas, los cuales no se evidenciaron en la curva cóncava. Finalmente, los máximos de disipación turbulenta se encontraron cerca del fondo en el tramo final de las huellas, y en la frontera entre la corriente principal y el flujo recirculante de cada escalón, y fueron mayores para la curva a la salida del canal.

Palabras clave: flujo rasante, canal escalonado, vertedero escalonado, curvas verticales, dinámica de fluidos computacional (CFD), turbulencia, disipación turbulenta.

Abstract

Stepped channels are frequently used for the discharge of water in reservoirs, however, there are few studies that consider the implementation of curves at their bottom. This article presents a quantitative evaluation, using numerical modeling with computational fluid dynamics (CFD), of the properties of skimming flow in steep stepped chutes with vertical curves. The stepped geometry was defined with a convex curve at the inlet, an intermediate straight chute, and a concave curve at the outlet. A comparative analysis was performed on the velocity, pressure, vorticity, and turbulence statistics fields in the three sections of the channel. It was concluded that the velocity profiles obtained with the RNG $k-\epsilon$ turbulence model presented a good agreement with experimental measurements in the non-aerated flow zone. However, the correlation decreased downstream since the numerical model did not capture the aeration phenomenon. When comparing the hydrodynamic behavior in both stepped curves, it was found that the separation zone covered a greater fraction of each step in the convex curve. In the latter, negative pressure values were observed at the height of the upper corner of the risers, which were not present in the concave curve. Finally, the turbulent dissipation maxima were found near the bottom in the final section of the treads, and on the border between the main stream and the recirculating flow of each step, being higher for the outlet curve.

Keywords: Skimming flow, stepped channel, stepped spillway, vertical curves, computational fluid dynamics (CFD), turbulence, turbulent dissipation.

Recibido: 04/07/2023

Aceptado: 30/10/2023

Publicado *online*: 01/12/2023

Introducción

Una rampa escalonada es un canal abierto con una serie de caídas o escalones en el fondo. La pendiente del canal está determinada por la relación entre la altura de la contrahuella y la longitud de la huella de cada peldaño. Existen tres regímenes de flujo: saltante, transición y rasante. El flujo saltante se caracteriza por chorros sucesivos en caída libre, con una cámara de aire entre el chorro y la contrahuella. En el rasante, la corriente principal pasa sobre el pseudofondo, que se define como la línea imaginaria que une las esquinas exteriores de los escalones, los cuales actúan como una macrorrugosidad (Chanson, 1994). Por último, el flujo de transición es una condición intermedia entre las dos anteriores, en la cual la cámara de aire aparece en algunos escalones y en otros no, y la superficie libre tiene un comportamiento caótico, con ciertas regiones de salpicaduras de agua (Chanson & Toombes, 2004).

El uso de vertederos escalonados se intensificó gracias al progreso mostrado por la industria en el manejo del concreto compactado con

rodillo desde finales del siglo XX (Chanson, 2001). Esto, sumado a que el flujo rasante ocurre con grandes descargas o altas pendientes (Chanson, 1994), se presenta con frecuencia en los vertederos de grandes embalses, y ha generado en los últimos años un interés creciente de los investigadores en describir cualitativa y cuantitativamente la hidrodinámica de tal régimen de flujo. A nivel cualitativo, Chanson (1994) encontró que bajo el pseudofondo, en las cavidades entre huella y contrahuella, se forman vórtices de recirculación, que se mantienen por la transferencia de esfuerzos desde la corriente principal. Si la huella es lo suficientemente larga, aguas abajo de los vórtices ocurre la readherencia del flujo principal a la superficie de los escalones. El mismo autor y Llano (2003) reportaron que inicialmente, a partir del primer escalón, se presenta la región no aireada del flujo, con una superficie libre de apariencia suave. En el fondo, los escalones generan turbulencia y la capa límite crece hasta interceptar la superficie libre en el denominado punto de inserción de aire (PIA). Aguas abajo, los niveles de turbulencia son lo suficientemente altos como para propiciar la región de flujo aireado.

La descripción cuantitativa de ambas regiones, aireada y no aireada, se ha basado sobre todo en el análisis de los campos de velocidad, presión y disipación de energía. Bombardelli, Meireles y Matos (2011) registraron mediciones de velocidad y profundidad del flujo en un modelo físico de un aliviadero escalonado de alta pendiente, aguas arriba del PIA, y compararon con resultados numéricos CFD usando los modelos de turbulencia $k - \varepsilon$ y RNG $k - \varepsilon$. Sus resultados de la tasa de crecimiento de la capa límite demostraron ser mayores que los reportados por otras investigaciones en descargas lisas. Asimismo, su análisis de las

estadísticas de la turbulencia mostró los máximos valores de energía cinética turbulenta y disipación turbulenta en el centro de las cavidades escalonadas, que aumenta en la dirección del flujo debido al desarrollo de la capa límite. En un estudio similar, Nikseresht, Talebbeydokhti y Rezaei (2013) usaron los modelos de turbulencia del tipo $k - \varepsilon$, $k - \omega$ y de esfuerzos de Reynolds para analizar el campo de flujo rasante en un vertedero escalonado de pendiente 1H:1V, y validaron los resultados con las mediciones de Chinnarasri y Wongwises (2006). Los autores reportaron vórtices de recirculación ocupando la totalidad de las cavidades escalonadas, con valores negativos de presión cerca de la esquina superior de las contrahuellas. Consideraron estos puntos posiciones críticas por ser más propensas al fenómeno de cavitación. Medhi, Singh, Thokchom y Mahapatra (2019) estudiaron las distribuciones de velocidad en las regiones de flujo aireado y no aireado, también para una pendiente 1H:1V, mediante técnicas experimentales de procesamiento de imágenes, y modelación numérica CFD con el modelo $k - \varepsilon$. Los resultados de los autores mostraron a mayor caudal el desplazamiento del PIA aguas abajo, lo que implica una mayor longitud de la región no aireada. En general, las máximas velocidades en el campo de flujo coincidieron aproximadamente con una profundidad intermedia, cercana al pseudofondo.

Las anteriores son solo algunas de las investigaciones reportadas en la literatura, presentadas por tener estructuras escalonadas con pendiente similar a la que se analizará en el presente estudio, o por usar metodologías equivalentes, por lo que servirán como punto de comparación para los resultados aquí obtenidos. El flujo rasante es, en

general, una temática madura en el estado del arte, que se ha estudiado ampliamente desde el siglo anterior, por lo que en la última década, los esfuerzos investigativos se han centrado en variaciones geométricas del fondo escalonado. Es el caso de Zare y Doering (2012), quienes analizaron el efecto de aristas redondeadas en las puntas de los escalones, o de Arjenaki y Sanayei (2020), quienes compararon el flujo sobre escalones típicos de huella horizontal, con casos de huella inclinada en la dirección transversal al flujo. En el presente artículo, por ejemplo, se considerará la variación progresiva de la longitud de la huella para conformar curvas verticales escalonadas a la entrada y salida del canal.

Al respecto de esta temática de estudio, es típico en el diseño de vertederos lisos recurrir en la entrada a una curva convexa que se ajuste a la trayectoria del flujo al desprenderse de la cresta superior y, a la salida, una cóncava, para minimizar las presiones ejercidas en el fondo del canal (Bureau of Reclamation, 1987). Aun así, en la revisión de literatura se encuentran pocos estudios que aborden la hidrodinámica del flujo en una configuración escalonada que se ajuste a este tipo de curvas. En primer lugar, Tabbara, Chatila y Awwad (2005) analizaron el flujo rasante en un vertedero escalonado de alta pendiente con curvas convexa y cóncava a la entrada y salida, respectivamente, mediante modelación numérica basada en el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. En ambas se reportaron perfiles de profundidad de flujo de forma curveada, similar a la del pseudofondo, y vórtices de recirculación ocupando la totalidad de los escalones, independientemente de la relación entre los tamaños de huella y contrahuella. Además, los máximos valores de presión se reportaron en la fracción final de las huellas. Cabe aclarar que los autores

no concluyeron respecto a diferencias significativas del flujo en ambas curvas. En los estudios de Attari y Sarfaraz (2012); Sarkardeh, Marosi y Roshan (2015); Henrique-Povh y Junji-Ota (2019), y Dalili-Khanghah y Kavianpour (2020) se consideró únicamente la curva convexa a la entrada y la importancia de incluir en ella escalones en transición (con magnitudes incrementales aguas abajo), para prevenir la ocurrencia de saltos de flujo en el paso de la curva al tramo recto del vertedero. Además, al comparar una curva escalonada con una lisa se encontraron para la primera menores velocidades del flujo en el tramo inicial del aliviadero y menor riesgo de cavitación aguas arriba del PIA.

Por último, las investigaciones de Ashoor y Riazi (2019), y Zuhaira, Al-Hamd, Alzabeebee y Cunningham (2021) son las más similares a nuestro trabajo, pues analizaron comparativamente el flujo rasante en vertederos escalonados con forma cóncava y convexa. Sin embargo, consideraron la totalidad de la estructura con una de las dos formas, mientras en el presente estudio ambas curvas verticales se repartieron en la entrada y la salida del mismo canal. En contraste a Tabbara *et al.* (2005), los autores reportaron diferencias relevantes entre ambas configuraciones del fondo, por ejemplo, se describió nuevamente la superficie libre del flujo con una forma similar a la geometría curvada del vertedero, pero encontraron una cámara de aire solamente en el primer escalón del caso cóncavo. Ello demostró la importancia de una curva convexa a la entrada para prevenir el desprendimiento del flujo. Además, para adaptar los escalones a las curvas se requirieron huellas más largas en el tramo final del fondo cóncavo y más cortas en el convexo. Este detalle implicó vórtices de mayor magnitud en el primero,

que propiciaron una mayor disipación de energía y, en consecuencia, menor velocidad a la salida de la estructura. Así quedó en evidencia el rol decisivo de la fracción de cada escalón que es ocupada por el flujo recirculatorio, y por ende también de la fracción remanente ocupada por el flujo readherido, en la magnitud de las variables hidrodinámicas en los escalones.

A la luz de los resultados de la literatura y los vacíos del conocimiento previamente reportados, y dado el régimen de flujo rasante en un canal escalonado de alta pendiente con tres tramos: una curva convexa a la entrada, una rampa recta intermedia, y una curva cóncava a la salida, en este artículo se analizaron por primera vez las diferencias en la hidrodinámica del flujo en estas tres regiones, distribuidas a lo largo de una misma estructura escalonada. Para esto, los objetivos del presente estudio se definieron así: 1) analizar la fracción de los escalones ocupada por la región de vórtices vs. la de flujo readherido; 2) definir la diferencia en la distribución de la velocidad, la presión, la vorticidad y las estadísticas de la turbulencia en dichas regiones; y 3) comparar la hidrodinámica del flujo en los tres tramos del canal con base en las variables de los objetivos 1 y 2.

Materiales y métodos

Información experimental

Los datos experimentales para validación del modelo numérico se obtuvieron de las mediciones reportadas por Hunt y Kadavy (2010a), y Hunt y Kadavy (2010b). En la Figura 1 se muestra el montaje

experimental, el cual consta de un canal con un ancho de 1.83 m, una cresta ancha de 2.40 m de longitud, y un tramo escalonado de 6.10 m de longitud medidos sobre la horizontal. La caída vertical total es de 1.5 m, con escalones de huellas de longitud l de 152 mm, y contrahuellas de altura h de 38 mm, que equivalen a una pendiente media de 4H:1V. El canal descarga finalmente a un cuenco de aquietamiento de 2.3 m de longitud. Para la toma de datos se utilizó un caudal unitario q de 0.28 m³/ms, y se definieron puntos de aforo sobre el eje del canal en las siguientes abscisas (absc.): 0.00, 0.61, 1.22, 1.83, 3.05 (corresponde al PIA), 3.66, 4.27 y 4.88 m.

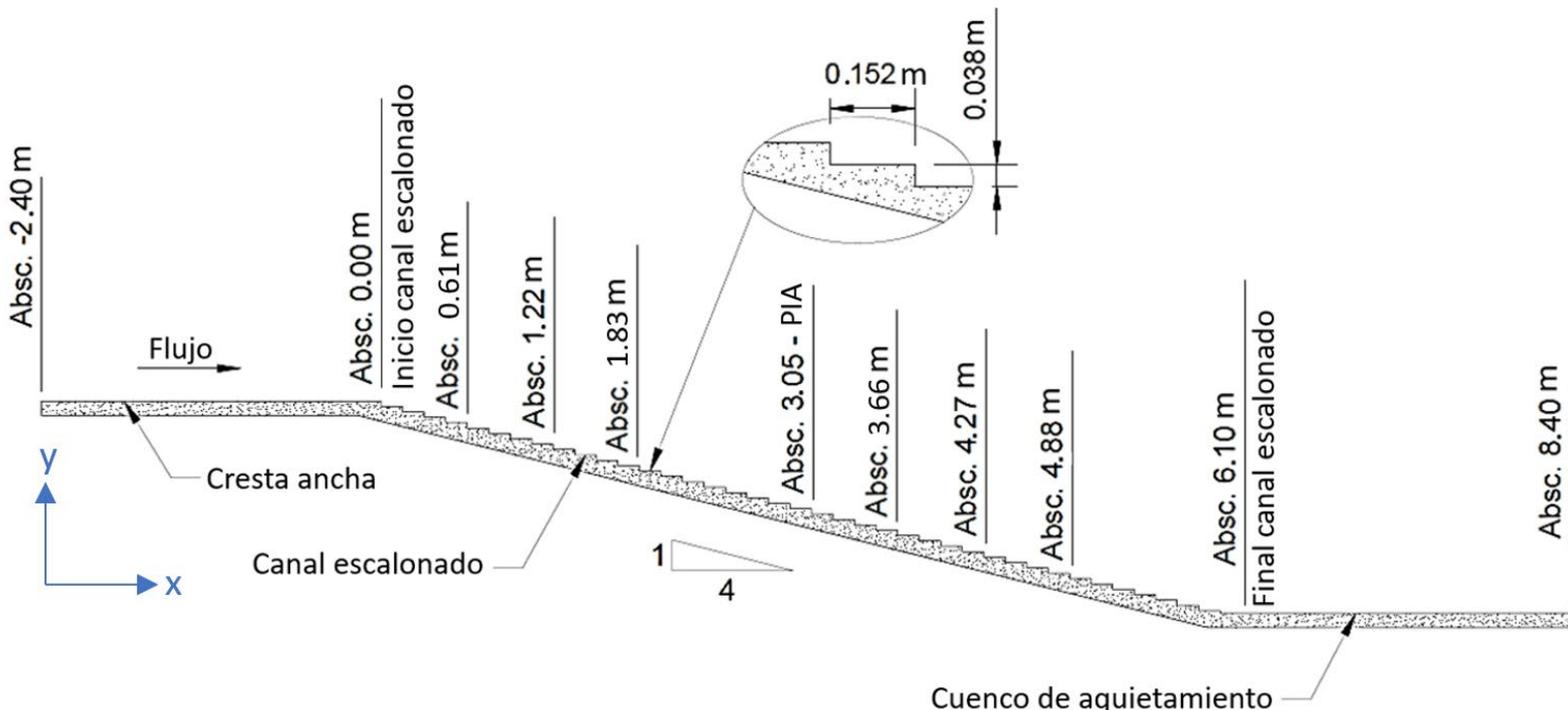


Figura 1. Geometría del prototipo experimental de canal escalonado.

Fuente: Hunt y Kadavy (2010a, 2010b).

Para la medición de la velocidad instantánea del flujo se utilizó un velocímetro acústico o “Acoustic Doppler Velocimeter” (ADV), un tubo Pitot (TP) acoplado a un transductor de presión diferencial, y una sonda de fibra óptica (FO). El uso del ADV estaba limitado a una velocidad máxima de 4.6 m/s (Hunt & Kadavy, 2010a), por lo que fue empleado aguas arriba del PIA. El TP no tenía la limitación del ADV, por lo que fue usado en toda la longitud del canal. Sin embargo, la principal fuente de error en la medición de la presión es la presencia de altas concentraciones de aire en el flujo (Matos, Frizell, André, & Frizell, 2002). Como verificación se utilizó entonces la FO aguas abajo de la absc. 3.05 m, ya que funciona adecuadamente en zonas con una gran fracción volumétrica de aire.

Configuración del modelo numérico para la validación

Modelos y ecuaciones

El *software* OpenFOAM fue utilizado para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS). Las ecuaciones de continuidad y de conservación del momento lineal para flujo incompresible en dos dimensiones (2D) son la Ecuación (1) y la Ecuación (2), respectivamente:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

Donde U_i es el vector velocidad del flujo medio; los subíndices $i, j = 1$ o 2 , las dos dimensiones en el espacio (x, y) ; x_i , el vector dirección; t , el tiempo; P , la presión estática del flujo medio; g_i , el vector gravedad $(0, -9.81)$ m/s²; ρ , la densidad del fluido; μ , la viscosidad dinámica; u'_i , el vector velocidad del flujo para las fluctuaciones turbulentas, y $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ es el tensor de esfuerzos de Reynolds. El flujo puede considerarse bidimensional si el ancho de la corriente es mayor de 5 a 10 veces la altura de la lámina de agua (Sotelo-Ávila, 2002). Como el ancho del canal escalonado es aproximadamente 18 veces la profundidad promedio del flujo registrada en la campaña experimental, las ecuaciones 2D resueltas a lo largo del plano central entre los muros laterales son adecuadas para la modelación.

El modelo de turbulencia seleccionado fue RNG $k - \varepsilon$, el cual se deriva a partir de una técnica matemática denominada *grupo de renormalización* (RNG). Aplica la hipótesis de Boussinesq para la viscosidad turbulenta (μ_T), tal que esta última se asume como un coeficiente de proporcionalidad entre el tensor de esfuerzos de Reynolds y los gradientes de velocidad del flujo medio; así como en el modelo estándar $k - \varepsilon$, se resuelven dos ecuaciones adicionales para el transporte de la energía cinética turbulenta (k) y de la tasa de disipación (ε), que corresponden a la Ecuación (3) y la Ecuación (4), respectivamente:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - R_\varepsilon^* \quad (4)$$

Donde $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.71942$ son los números de Prandtl efectivos para k y ε , respectivamente; P_k , la producción de k ; $C_{1\varepsilon} = 1.42$, una constante derivada analíticamente con la teoría RNG; R_ε^* , un término adicional respecto al modelo estándar, que mejora el desempeño en flujos rápidamente deformados y con curvatura en las líneas de corriente (Escue & Cui, 2010).

Estos fenómenos hidrodinámicos son típicos de los vórtices de recirculación presentes en el flujo rasante, en las cavidades entre huella y contrahuella de los escalones, así como en la corriente principal en la zona de impacto con el tramo final de la huella, justo aguas abajo del vórtice. La viscosidad turbulenta se calcula como $\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, con la constante $C_\mu = 0.0845$, también derivada con RNG. Para mayor detalle respecto a las ecuaciones y términos, se recomiendan los estudios de Yakhot, Orszag, Thangam, Gatski y Speziale (1992), y Orszag, Yakhot, Flannery y Boysan (1993), quienes propusieron el modelo.

Para el modelado de la superficie libre del agua se aplicó el modelo de volúmenes de fluidos (VOF) propuesto por Hirt y Nichols (1981), el cual agrega un término extra (F_s) a la Ecuación (2) para tener en cuenta la tensión superficial en la interfase agua-aire. Además, ρ se reemplaza

por la densidad de la mezcla (ρ_m). F_s y ρ_m se presentan en la Ecuación (5) y la Ecuación (6), respectivamente:

$$F_s = \int_{s'} \sigma k' n' \delta(x - x') ds' \quad (5)$$

$$\rho_m = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (6)$$

Donde s' es la superficie libre; σ , el coeficiente de tensión superficial entre el agua y el aire; k' , la curvatura de la superficie libre; n' , el vector unitario normal a la superficie libre; $\delta(x - x')$, la función delta Dirac, siendo x la coordenada en la que se evalúa la función; x' , un punto en la superficie libre para garantizar que solo allí se suma F_s ; α , la fracción volumétrica del agua y se define como la relación entre el volumen de la celda (área en 2D) ocupada por este líquido y su volumen total; ρ_l , las densidades de las fases agua; ρ_g , las densidades de las fases aire.

Adicionalmente, se resuelve la Ecuación (7) de transporte para α :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} + \frac{\partial (U_{jc} \alpha (1 - \alpha))}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

Donde el tercer término al lado izquierdo de la ecuación tiene la función de comprimir la superficie libre, ya que $\alpha(1 - \alpha)$ asegura que solo se active en esta región del flujo. El vector velocidad de compresión (U_{jc}) en OpenFOAM está acotado por la magnitud del vector velocidad en las

caras de las celdas ($|U_{jf}|$), máxima en el campo de flujo, y su dirección está alineada con el vector normal a la interfase (n_{jf}). Así se garantiza en la Ecuación (8) (Cifani *et al.*, 2016) que el término de compresión solo introduce flujo de α en la dirección normal a la superficie libre:

$$U_{jc} = \left[\min \left(C_\alpha |U_{jf}|, (|U_{jf}|)_{\max} \right) \right] n_{jf} \quad (8)$$

Donde C_α es un coeficiente que define el efecto del término de compresión. Para valores cercanos a 0 se produce una superficie libre difusa, y para valores mayores a 1 se distorsiona y se puede generar inestabilidad numérica. En el presente estudio se utilizó $C_\alpha = 1$.

Para la solución de las ecuaciones se utilizó el solver *interFoam* con el algoritmo de acoplamiento presión-velocidad PISO. En este último, la Ecuación (1) de continuidad discretizada mediante el método de volúmenes finitos es adaptada como una ecuación de presión, con el objetivo de realizar la corrección del momento dos veces. Para mayor detalle de la implementación del algoritmo PISO en OpenFOAM, se recomiendan las notas de Greenshields y Weller (2022). La aplicación de factores de subrelajación no fue necesaria.

Malla de cómputo y condiciones de frontera

En la Figura 2 se presentan las fronteras del dominio geométrico del modelo y la malla de cómputo utilizada. Las condiciones iniciales (CI) y

de frontera (CF) aplicadas a los límites de la Figura 2a se describen a continuación.

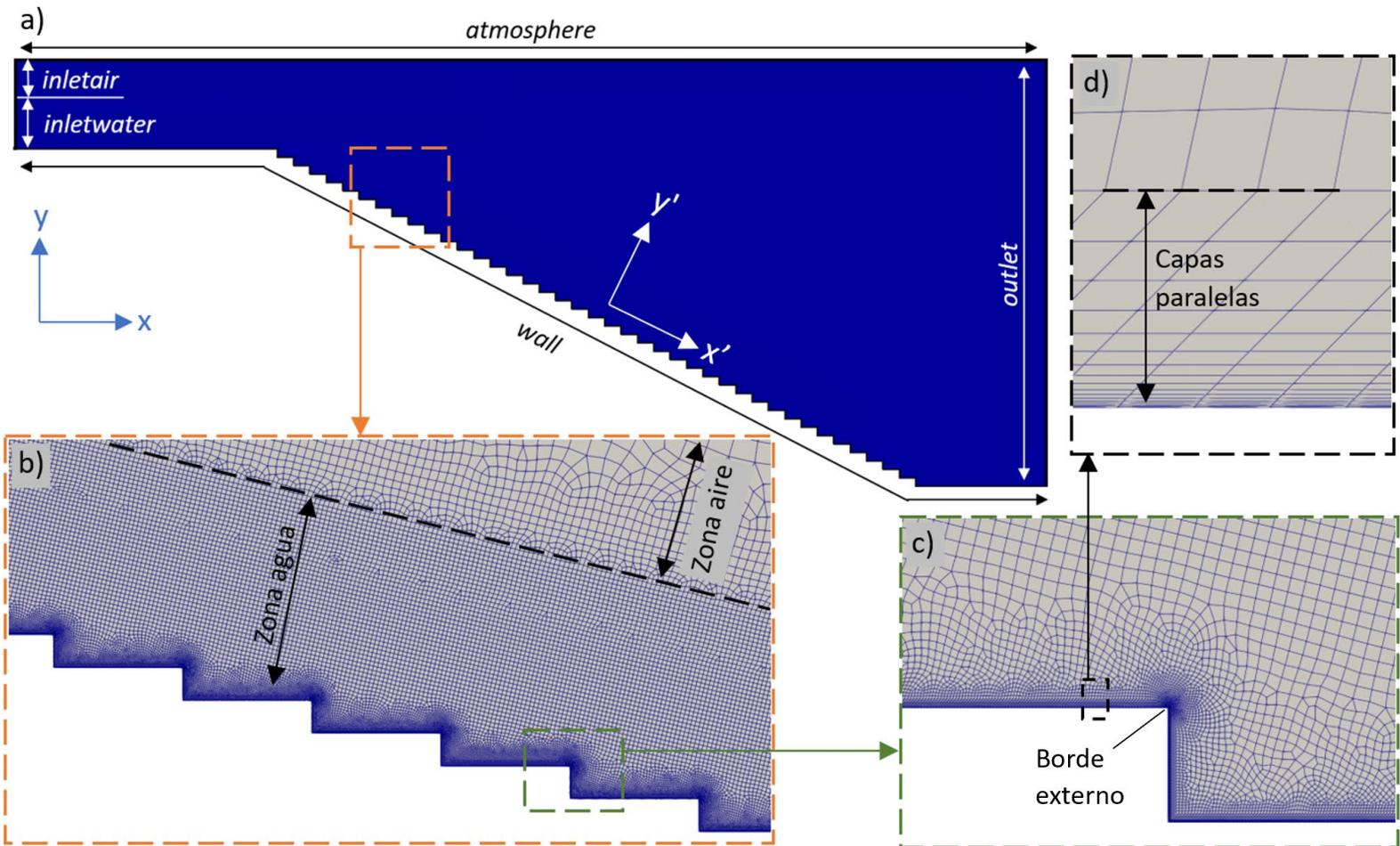


Figura 2. a) fronteras y geometría del modelo numérico para la validación, b) malla de cómputo en la zona de agua y zona de aire, c) detalle de la malla en los escalones, d) capas paralelas al fondo.

- **Velocidad:** en *inletwater* se aplica un vector velocidad de entrada de agua de $(1.21, 0)$ m/s, que en la altura de la frontera de 0.23 m

produce el mismo q experimental de $0.28 \text{ m}^3/\text{ms}$. En *inletair* y *atmosphere* se aplicó la CF *pressureInletOutletVelocity*, la cual se combina con *totalPressure* para la presión, en límites atmosféricos en los que puede haber flujo de entrada, pero se desconoce su velocidad. Esta CF especifica gradiente cero para la velocidad (Greenshields, 2022). En *outlet* se definió la CF *inletOutlet*, que define gradiente cero para flujo de salida, y un vector velocidad de $(0, 0) \text{ m/s}$ para flujo de entrada. Para *wall* se utilizó la CF *noSlip*, garantizando velocidad cero en el fondo escalonado. La CI definió un vector velocidad $(0, 0) \text{ m/s}$ en todo el dominio interno.

- **Presión:** en *inletwater*, *outlet* y *wall* se definió la CF *fixedFluxPressure*, la cual es equivalente a gradiente cero, pero ajusta el gradiente de presión tal que el flujo en la frontera se ajuste a la CF de velocidad. Es útil en casos en los que las ecuaciones de solución incluyen fuerzas gravitacionales y de tensión superficial (Greenshields, 2022). Los límites *inletair* y *atmosphere* se calcularon con la CF *totalPressure*, tal que para flujo de salida la presión manométrica es la atmosférica (p_o) de 0 Pa , y para flujo de entrada es $p_o - 0.5\rho U_n^2$, donde U_n es la magnitud de la velocidad normal de entrada (no hay velocidad tangencial). Para la CI se asumió p_o en todo el dominio interno.
- **Turbulencia:** en *inletwater*, los valores de k y ε se definieron con las aproximaciones de la Ecuación (9) (Versteeg & Malalasekera, 2007):

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2, \varepsilon = 0.09^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}, l = 0.07L \quad (9)$$

Donde U_{ref} es la magnitud de la velocidad en la frontera; T_i , la intensidad de la turbulencia asumida como 3 %; l , la escala de longitud turbulenta, asumida como una función de la longitud característica a la entrada del canal (L); k , $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$; ε es $0.0009 \text{ m}^2/\text{s}^3$.

En *wall* se estableció la CF *epsilonWallFunction* para ε , la cual determina el valor de la disipación, dependiendo la distancia adimensional a la primera celda (y^+). Si $y^+ < 11$, se utilizan las deducciones para la subcapa viscosa; si $y^+ > 11$, las de la subcapa inercial que se comporta con base en la ley de logaritmos. El valor límite de 11 resulta de la intersección de los perfiles de velocidad en ambas regiones de la capa límite (Greenshields & Weller, 2022). Para el cálculo de y^+ y ε en OpenFOAM se utilizó la Ecuación (10):

$$y^+ = C_\mu^{1/4} \frac{k^{1/2} y_w}{\nu}, \varepsilon = \varepsilon_{vis} = \frac{2\nu k}{y_w^2} \quad (10)$$

Donde y_w es la distancia del centro de la celda a la pared; ν , la viscosidad cinemática del fluido, y ε_{vis} es la disipación en la subcapa viscosa.

No se presenta en este estudio la expresión para $y^+ > 11$, ya que como se describe más abajo en la descripción de la malla, la altura de la primera capa de celdas garantizó una solución completa de la capa límite. Por lo anterior, la CF *nutkWallFunction* para μ_T asumió un valor fijo de cero, dado que la resolución de la malla garantizó flujo laminar cerca a la

pared. Para k se aplicó la CF $kqRWallFunction$, que equivale a gradiente cero. En el resto de las fronteras se definió la CF *inletOutlet* para k y ε , y para la CI se aplicaron en todo el dominio los mismos resultados obtenidos para la entrada con la Ecuación (9).

- **Fracción volumétrica de agua:** en *inletwater* se definió un valor de α de 1. Para las fronteras de aire se definió la CF *inletOutlet* con un valor de entrada de cero, y para el fondo la CF de gradiente cero. Para la CI se asumió α de 0 en todo el dominio, tal que estaba lleno de aire y el agua a punto de entrar por *inletwater*.

La malla de cómputo tuvo dos regiones principales: zona del agua y zona del aire (Figura 2b). La primera tuvo una mayor resolución, pues incluyó el flujo de la corriente principal sobre los escalones, así como la superficie libre. La segunda solamente modela los flujos de aire atmosférico, por lo que se generó con menor resolución, aumentando esta última solo cerca de la frontera con la zona del agua. En los escalones, a menor distancia a la pared, se redujo de forma gradual la magnitud de las celdas y aumentó la resolución en los bordes externos por ser los puntos de mayores gradientes (Figura 2c). En la región colindante con la frontera *wall* y de forma paralela a su geometría se generaron capas de celdas con un factor de crecimiento de 1.3 (relación de altura entre dos capas subsiguientes), a fin de capturar los fenómenos de flujo en la subcapa viscosa y en la región de transición a la subcapa inercial (Figura 2d).

Para establecer las resoluciones se realizó inicialmente un análisis de sensibilidad con tres mallas. En la Tabla 1 se presentan las características principales que las diferencian. La resolución en la zona del

agua hace referencia al tamaño promedio de las caras de las celdas lejos de los escalones (no tiene en cuenta el aumento de la resolución cerca a la pared), y y^+ promedio y máximo resultó de analizar las distancias adimensionales de todas las celdas en la primera capa paralela, adyacente a la frontera *wall* y cuya altura también se incluye en la Tabla 1. El valor del error promedio numérico respecto a la información experimental ($E_{prom.}$) en las abscisas 0.00, 0.61, 1.22 y 1.83 m se calculó con la Ecuación (11):

$$E_{prom} (\%) = \frac{100}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{(U_{x'-RNG\ k-\varepsilon})_n - (U_{x'-exp})_n}{(U_{x'-exp})_n} \right] \quad (11)$$

Donde n son los puntos de medición en cada abscisa, que aumentan en la dirección y' perpendicular al pseudofondo (ver los ejes en la Figura 2a) hasta el punto más lejano a la pared (N); $U_{x'-RNG\ k-\varepsilon}$ la velocidad del flujo calculada por el modelo numérico con $RNG\ k - \varepsilon$ para la turbulencia; y $U_{x'-exp}$ es la medida en la campaña experimental con TP, ADV y FO, todas en la dirección x' .

Tabla 1. Análisis de sensibilidad de malla del modelo numérico para la validación.

Mallas	Número total de celdas	Resolución zona de agua (m)	Altura primera capa paralela (m)	y^+ promedio	y^+ máximo	E_{prom} absc. 0.00 m (%)	E_{prom} absc. 0.61 m (%)	E_{prom} absc. 1.22 m (%)	E_{prom} absc. 1.83 m (%)
Malla 1	500 241	5.00E-03	1.00E-05	0.4	1.9	1.4	3.9	3.9	5.0
Malla 2	191 531	7.00E-03	5.00E-05	1.8	5.2	2.0	4.2	3.7	5.1
Malla 3	125 822	9.00E-03	1.00E-04	3.6	8.7	2.0	4.4	3.8	5.2

Solo se analizaron las abscisas en la zona no aireada, pues el modelo numérico no capturó la inserción de aire aguas abajo del PIA. En este estudio se considera que la selección de la malla se debe basar en el análisis de los resultados en comparación con las mediciones experimentales en la zona en que el modelo numérico logra capturar fielmente las características del flujo rasante.

Los errores promedio obtenidos demuestran que en los tres casos los resultados numéricos son independientes de la resolución de malla. La principal diferencia se da en la abscisa 0.00 m para la malla 1 respecto a la 2 y la 3; pero conforme el flujo avanza hacia el PIA, E_{prom} se vuelve aproximadamente igual para las tres mallas. En la Figura 3a se presentan los perfiles de velocidad numéricos en la abscisa 1.83 m, junto con las mediciones con TP. En la Figura 3b y c, se puede observar a una escala ampliada el comportamiento de las tres resoluciones de cómputo en las zonas encerradas por los paneles señalados en la Figura 3a.

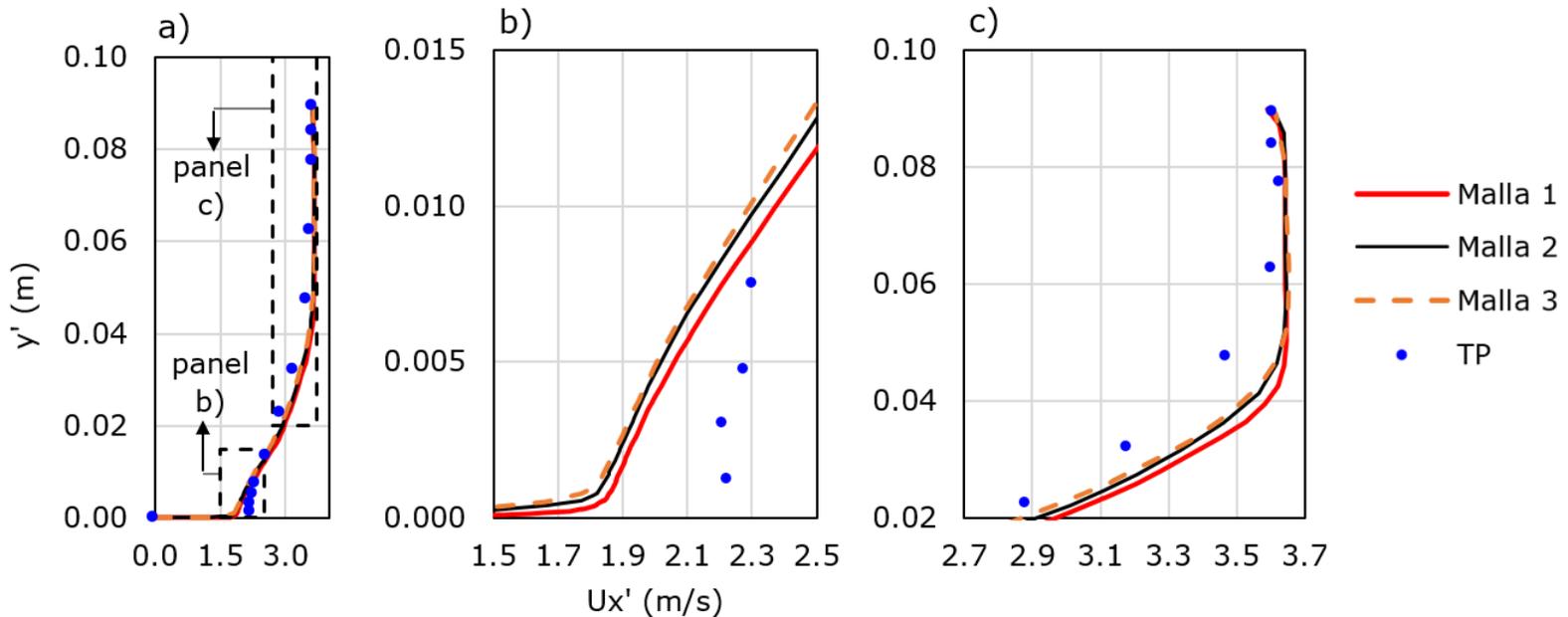


Figura 3. a) Perfiles de velocidad experimental y numéricos para las tres mallas en la abscisa 1.83 m; b) detalle del perfil de velocidades cerca al fondo; c) detalle del perfil de velocidades en la corriente principal.

Cerca del fondo escalonado (Figura 3b), el modelo numérico subestima la velocidad del flujo y la diferencia respecto a las mediciones es menor para la malla más fina. Más lejos de la pared, en la zona de gradientes de velocidad de la corriente principal (Figura 3c), la velocidad del modelo numérico es mayor a la experimental y, contrario a lo mostrado cerca al pseudofondo, la diferencia es mayor para la malla 1. Más cerca de la superficie libre, fuera de la capa límite, las tres mallas convergen al mismo resultado. Finalmente se puede afirmar que aunque

en la mayoría de abscisas se obtuvo un E_{prom} menor para la malla de mayor resolución, no hay una diferencia considerable entre los tres resultados numéricos. Este comportamiento es similar en las demás abscisas aguas arriba, por lo tanto no amerita incluirlas en la Figura 3.

Debido a lo discutido anteriormente, la selección de la malla no se basa en E_{prom} sino en los valores de y^+ promedio y máximo. Con el fin de obtener una modelación completa de la capa límite, la malla debe tener celdas lo suficientemente delgadas cerca de la pared para resolver el flujo en la subcapa viscosa (región delimitada por $y^+ < 5$). Para lo anterior se recomienda en la primera capa un $y^+ \sim 1$ (Greenshields & Weller, 2022). A pesar de que el valor promedio en las mallas 2 y 3 se encuentra dentro de la región de flujo laminar, el valor máximo no. En consecuencia, se puede afirmar que parte de la frontera con los escalones está en la región de transición a la zona logarítmica (región delimitada por $5 < y^+ < 30$), en la que tanto los esfuerzos viscosos como de Reynolds son importantes (Versteeg & Malalasekera, 2007). Solo la malla 1 puede garantizar la solución de la subcapa viscosa en toda la frontera *wall* (y^+ promedio y máximo < 5), por lo que se seleccionó para las corridas del presente artículo.

Configuración del modelo numérico para el canal escalonado con curvas verticales

Con base en la validación del modelo numérico con los datos experimentales de Hunt y Kadavy (2010a, 2010b), se procedió después a ejecutar una corrida adicional en un canal escalonado con curvas

verticales. Se utilizó el mismo modelo de turbulencia y de flujo multifásico: RNG $k - \varepsilon$ y VOF, respectivamente. En la Figura 4 se presentan los parámetros geométricos del canal. La caída vertical total se mantuvo de 1.5 m aproximadamente, pero se incrementó la pendiente media del tramo recto (1H:1V), con escalones de h y l de 38 mm. Este aumento fue con el fin de obtener las curvas del pseudofondo más pronunciadas (de menor radio) y poder ajustar la geometría de los escalones a las mismas. Para esto se definieron con h constante también de 38 mm, y l variable extendiendo cada huella hasta interceptar la curva. Se seleccionaron para análisis posterior en la sección de resultados los escalones A, B y C en la curva 1 (convexa), y sus correspondientes de igual geometría G, F y E, respectivamente, en la curva 2 (cóncava). Se identificó el D en el tramo recto para efectos de comparación con la zona sin curvas.

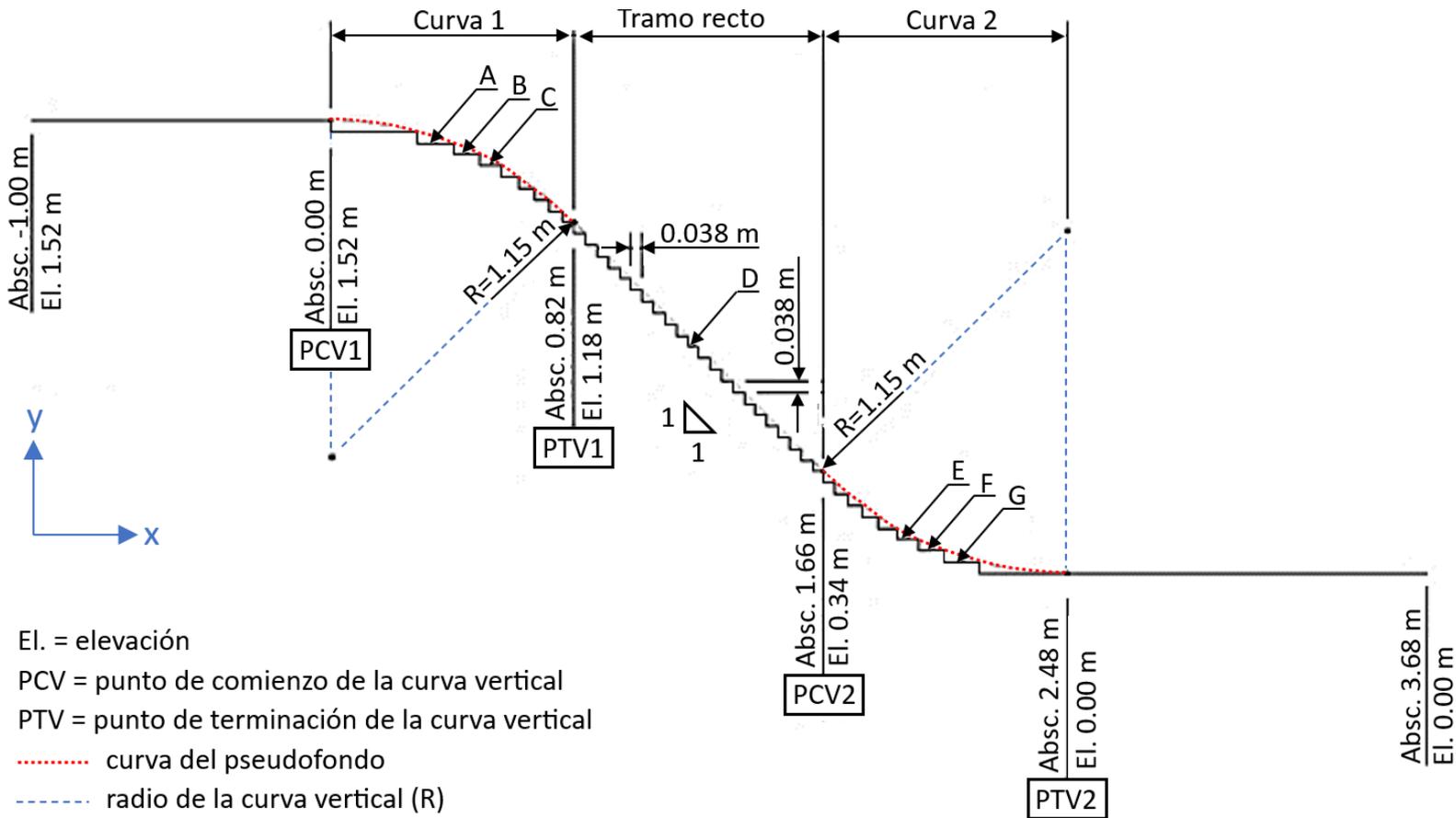


Figura 4. Geometría del canal escalonado con curvas verticales.

Para el diseño de la curva convexa del pseudofondo, el Bureau of Reclamation (1987) recomienda que el fondo describa una forma ligeramente más plana que la de la trayectoria del chorro libre, lanzado con una cabeza igual a la energía específica de la corriente al iniciar la curva. Para la geometría propone la Ecuación (12):

$$-y = x \tan \theta + \frac{x^2}{K[4(d+h_v) \cos^2 \theta]} \quad (12)$$

Donde θ es el ángulo de inclinación del fondo del canal aguas arriba de la curva; K , un factor que debe ser igual o superior a 1.5 para garantizar presiones positivas distribuidas en toda la superficie de contacto de la curva y evitar la separación del flujo; h_v , la cabeza de velocidad, y d es la profundidad del flujo en el PCV.

Para la curva cóncava, la recomendación de diseño se basa en un radio suficiente para minimizar las fuerzas dinámicas producidas en el fondo por el cambio en la dirección del flujo. Radios mayores o iguales a cinco veces la profundidad del flujo se consideran aceptables (Bureau of Reclamation, 1987). Se seleccionó $R = 1.15 \text{ m}$ (Figura 4) en función de la máxima profundidad del flujo en la entrada del canal (0.23 m), cumpliendo con la recomendación para la curva 2, y aproximándose a la trayectoria descrita por la Ecuación (12) para la curva 1.

En la Figura 5a se presentan las fronteras del dominio geométrico del modelo. Las CI y CF aplicadas a los límites fueron las mismas validadas en el modelo previo. La malla de cómputo presentada en la Figura 5b-d se generó también con base en los mismos parámetros del modelo para la validación. Se obtuvo un número total de celdas de 393 239, conservando la misma resolución en la zona del agua de 5.00E-03 m. Aunque $q = 0.28 \text{ m}^3/\text{ms}$ es el mismo, la velocidad del flujo y el esfuerzo cortante en la pared aumentan debido a la mayor pendiente en el canal escalonado con curvas. Por lo anterior fue necesario disminuir la altura de la primera capa paralela: 5.00E-06 m, para garantizar la modelación de la subcapa viscosa (y^+ promedio y máximo de 0.2 y 1.3, respectivamente).

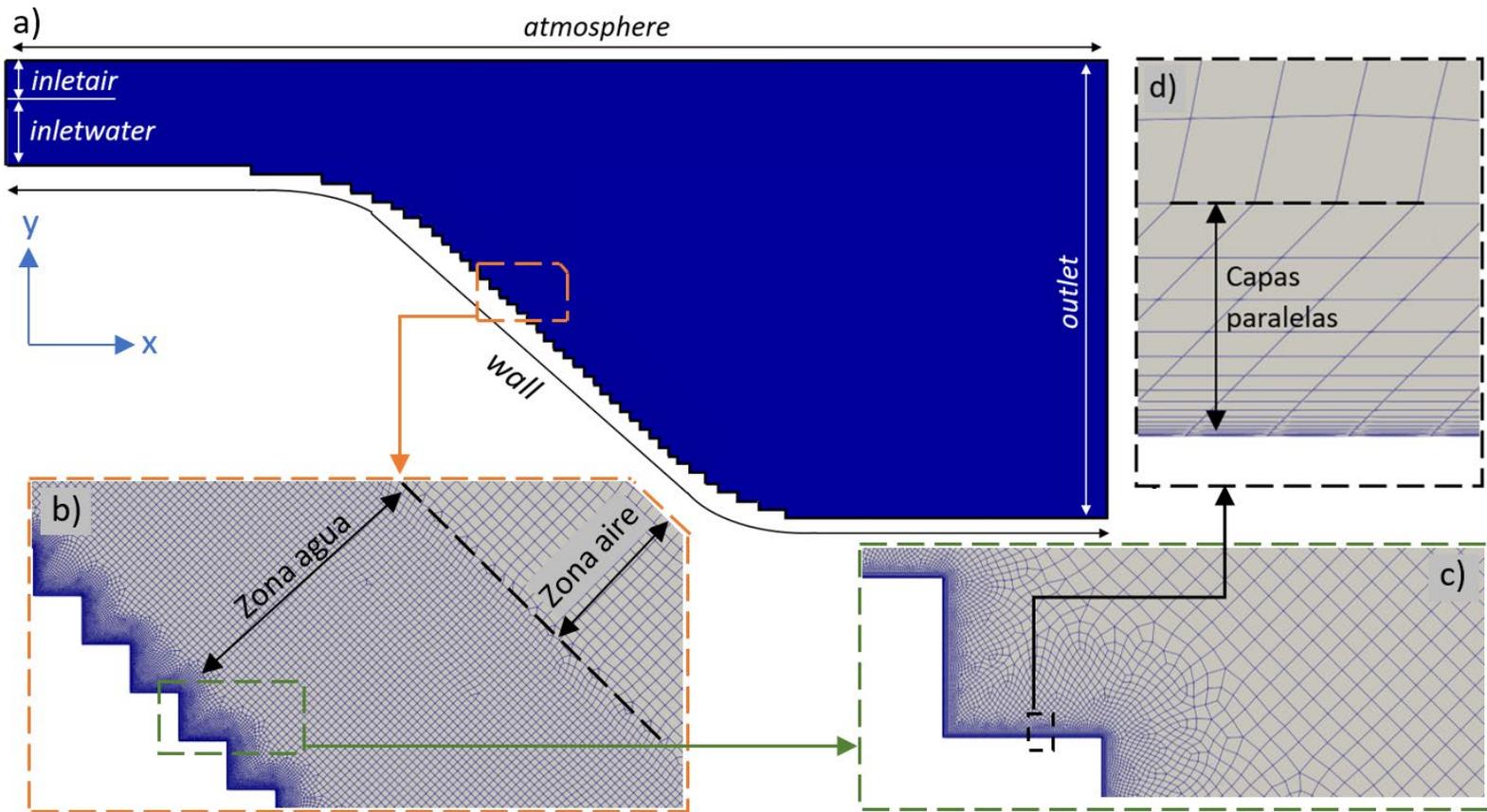


Figura 5. a) fronteras y geometría del modelo numérico con curvas verticales, b) malla de cómputo en la zona de agua y zona de aire, c) detalle de la malla en los escalones, d) capas paralelas al fondo.

Resultados y discusión

Los resultados corresponden a la condición final de flujo permanente, la cual se alcanza un tiempo después de que el flujo sale por la frontera *outlet*, suficiente para que las variables hidrodinámicas se estabilicen.

Validación del modelo numérico

En las Figuras 6a y 6b se presentan los perfiles de velocidad numéricos con el modelo de turbulencia RNG $k - \varepsilon$, aguas arriba y aguas abajo del PIA, respectivamente, junto con las mediciones con TP, ADV y FO. En general, en las abscisas aguas arriba del PIA se observa un buen ajuste de los datos numéricos a los datos experimentales. En la abscisa 0.00 m, el modelo numérico logra capturar la forma y magnitud del perfil de velocidades del flujo medio en toda la distancia y' . Entre las abscisas 0.61 y 3.05 m, cerca del fondo, para valores de y' menores a aproximadamente 0.01 m (26 % de h), los resultados numéricos subestiman los datos experimentales. Lejos del fondo, en las zonas de bajo gradiente de velocidad (por fuera de la capa límite), el ajuste es satisfactorio en todas las estaciones. Sin embargo, en la abscisa 3.05 m, se observa por primera vez gradiente de velocidades en todo el rango de y' , lo cual indica la intercepción de la capa límite con la superficie libre. Lo anterior coincide con el reporte experimental del PIA. Similar a lo mostrado en la Figura 6a y Tabla 1, Bombardelli *et al.* (2011) también obtuvieron un aumento en el error numérico respecto a las mediciones a medida que el flujo se aproximaba al PIA, reportando un E_{prom} de 7 %. El ajuste en el presente estudio es un poco mejor, al obtenerse un E_{prom} máximo de 5 % en la zona de flujo no aireado.

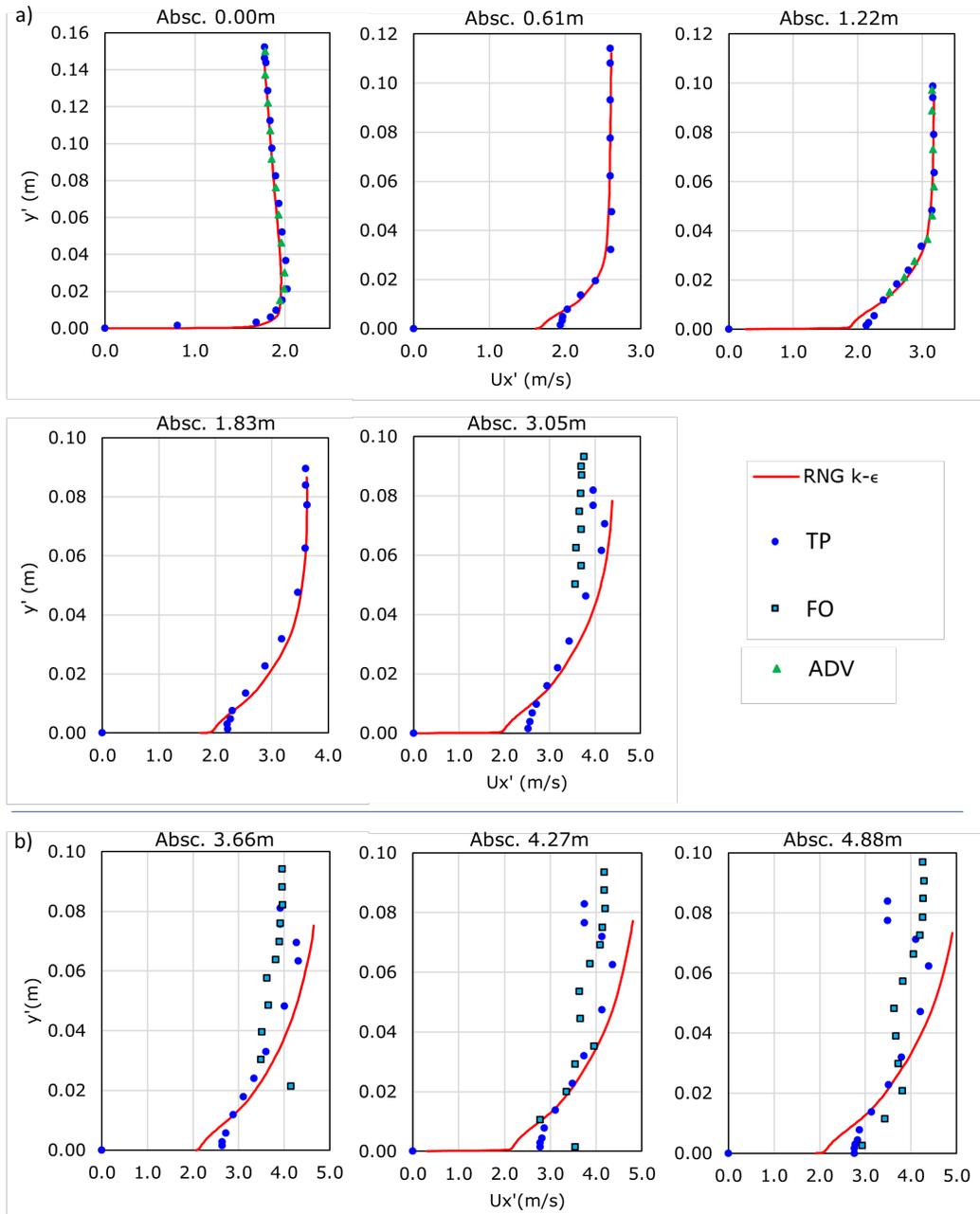


Figura 6. Validación de los perfiles de velocidad del flujo medio para un caudal unitario de $0.28 \text{ m}^3/\text{ms}$ en: a) las abscisas aguas arriba del PIA; b) las abscisas aguas abajo del PIA. Fuente de datos experimentales: Hunt y Kadavy (2010a, 2010b).

En la zona de flujo aireado, aunque los perfiles numéricos capturan la forma de los perfiles experimentales, la calidad del ajuste continúa disminuyendo en la dirección del flujo. Para $y' < 0.01$ m, a mayor distancia aguas abajo, mayor es la subestimación de las mediciones; para $y' > 0.01$ m, mayor es la sobrestimación de la velocidad numérica respecto a la experimental. Esta sobrestimación y menor calidad en el ajuste también fue reportada por Cheng, Luo, Zhao y Li (2004), quienes usaron el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar. El mayor error aguas abajo del PIA se debe a que las corridas numéricas no capturaron la aireación del flujo en dicha región. Esto se puede verificar tanto para el modelo numérico de validación como para el de curvas verticales en la Figura 7, que presenta la variación de α en el espacio. Nótese que para el flujo de agua entre las fronteras *inletwater* y *outlet*, $\alpha = 1$ en todo el dominio. Resultados similares de α fueron reportados por Medhi *et al.* (2019).

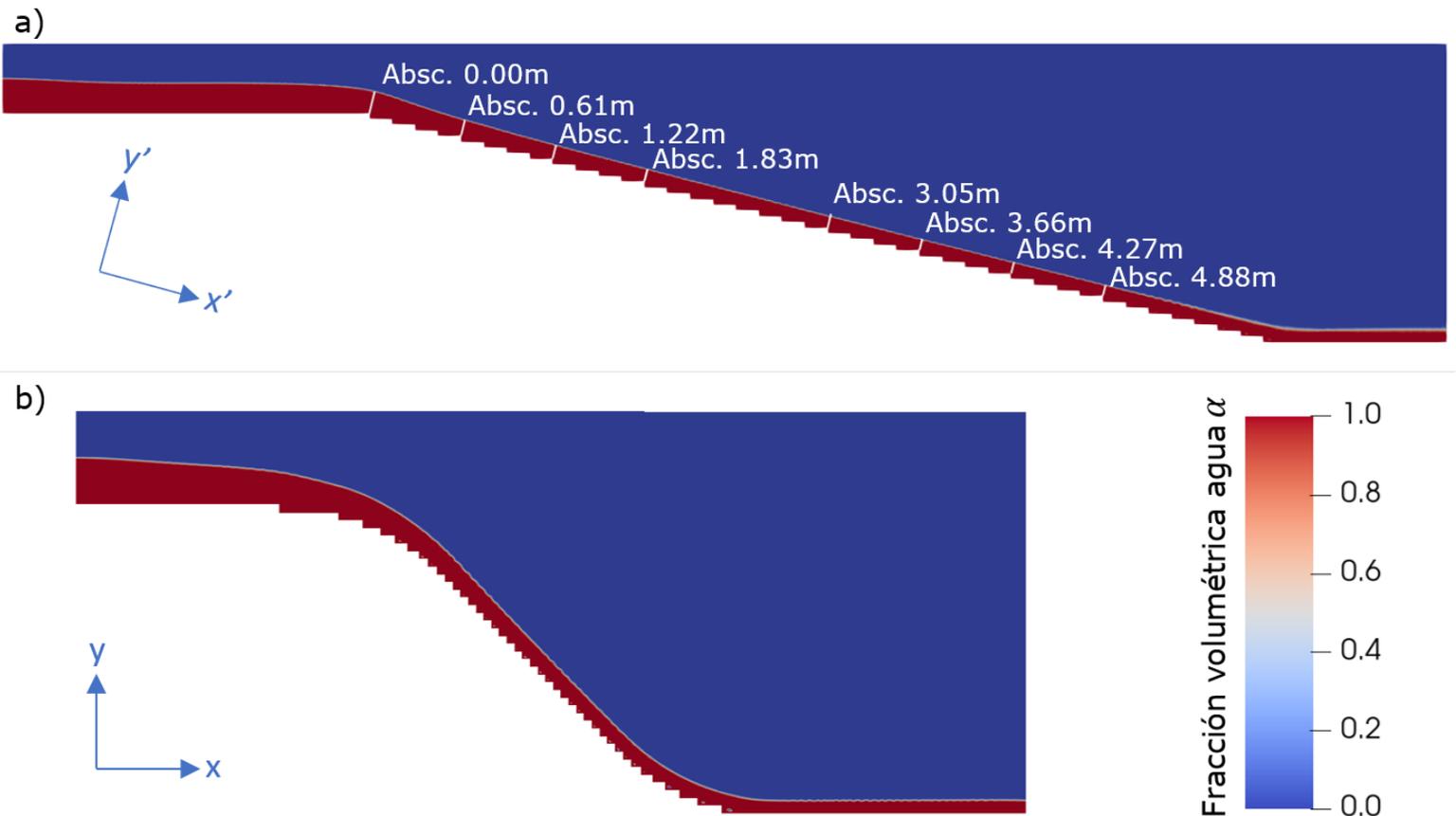


Figura 7. Fracción volumétrica de agua α en: a) modelo numérico para la validación; b) modelo numérico con curvas verticales.

La dificultad para capturar el fenómeno de aireación del flujo fue reportada por Casa, Hidalgo, Castro, Ortega y Vera (2018), quienes aplicaron un submodelo de incorporación de aire mediante el *software* Flow-3D. Cuando una perturbación de magnitud igual a la escala de longitud turbulenta en la superficie libre está asociada con una energía cinética turbulenta por unidad de volumen (P_t), mayor que la energía asociada con las fuerzas estabilizadoras de gravedad y tensión superficial (P_d), el submodelo permite la entrada de un volumen de aire (Hirt, 2003).

Sin embargo, los resultados de Casa *et al.* (2018) para la profundidad del flujo en la región aireada, utilizando también VOF y RNG $k - \varepsilon$, mostraron una gran dependencia de la resolución de la malla, y errores que aumentaron hasta más del 100 % respecto a la información experimental, a medida que se disminuía el tamaño de la celda.

En simulación con grandes “eddies” (LES), las estructuras más grandes se resuelven directamente mientras que las más pequeñas se modelan. Se basa en la idea de que el momento, la masa y la energía se transportan principalmente por los “eddies” de mayor tamaño, que varían en función de la geometría y las condiciones de frontera del flujo analizado. Los “eddies” pequeños, por otro lado, tienden a ser más isotrópicos y universales (Ansys Inc., 2022). Al no aplicarse el filtro temporal típico de los modelos promediados por Reynolds, como el RNG $k - \varepsilon$ del presente estudio, se obtienen las fluctuaciones de velocidad de las estructuras del flujo de mayor escala, lo cual resulta en diversas ventajas para el modelado del flujo rasante. Por ejemplo, permite capturar la anisotropía de la turbulencia (lo cual no es posible con la hipótesis de Boussinesq), por lo que se predicen mejor los flujos con cambios repentinos en la tasa de deformación media, con separación de la capa límite, flujos sobre superficies curvas, fluidos en rotación y flujos tridimensionales (Wilcox, 2006). Todas las anteriores, características típicas en canales escalonados con curvas verticales. Además, los resultados obtenidos por Zhan, Zhang y Gong (2016) para la modelación del flujo rasante mediante el modelo Euleriano de Chahed, Roig y Masbernat (2003) para el flujo multifásico, combinado con RNG $k - \varepsilon$, mostraron resultados similares a los de la Figura 7. No obstante, al utilizar

LES para la turbulencia, una inspección cualitativa de la animación del Apéndice A de dicha referencia permite observar cómo las fluctuaciones instantáneas en la superficie libre contribuyen al atrapamiento de aire, fenómeno suprimido por la promediación de Reynolds en la Figura 7. La comparación de los perfiles numéricos de α con los experimentales mostraron resultados satisfactorios. Por lo tanto, dentro de los planes para futuras investigaciones, el grupo de trabajo de este artículo pretende analizar curvas verticales escalonadas en la región aireada utilizando LES.

Otro detalle para remarcar en las Figuras 6a y 6b es que de la abscisa 1.83 m hacia aguas abajo, incluyendo el flujo aireado, los datos experimentales con TP muestran cerca del fondo una velocidad aproximadamente constante. Este comportamiento fue reportado previamente de forma experimental por Boes y Hager (2003), y Gonzalez (2005), y de forma numérica para la región no aireada por Bombardelli *et al.* (2011). Sin embargo, las modelaciones numéricas del presente estudio no lo capturan de forma adecuada a pesar de aplicarse una modelación completa de la capa límite. Este comportamiento puede estar asociado con una subestimación de μ_T en el modelo RNG $k - \varepsilon$, que limita el transporte turbulento de flujo con mayor momento desde las zonas más alejadas de la pared hacia el fondo escalonado, causando una subestimación de la velocidad. Aun así, Bombardelli *et al.* (2011), a pesar de usar el mismo modelo de turbulencia, reportaron el fenómeno contrario: sobrestimación de la velocidad. La simplificación del flujo a una condición 2D y de la turbulencia a una condición promediada por Reynolds puede influir también al no capturar las estructuras de flujo tridimensionales ni la influencia de la anisotropía del tensor de esfuerzos

de Reynolds (ver la diferencia en las estructuras recirculantes del flujo, capturadas mediante un modelo LES vs. un RANS por Zhan *et al.* (2016)). Se recomienda más investigación para dar claridad al respecto.

Presión y tasa de disipación turbulenta en el canal con curvas verticales escalonadas

Al aplicar la simplificación de Prandtl a la Ecuación (2) de momento en x , para flujo cercano al fondo, se asume que el término advectivo es nulo (ya que $U_x \approx U_y \approx 0$), y $\overline{\rho u_i' u_j'}$ también, pues los esfuerzos turbulentos en esta zona son despreciables (Kundu, Cohen, & Dowling, 2012). Se obtiene entonces la Ecuación (13):

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{pared} = \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2}\right)_{pared} \quad (13)$$

Donde $(\partial P/\partial x)_{pared}$ es el gradiente presión en la dirección x sobre la huella de los escalones; $\mu(\partial^2 U_x/\partial y^2)_{pared}$ es la curvatura del perfil de velocidades del flujo medio (U_x vs. y) cerca de la pared.

El término de la izquierda cumple un rol importante en la dirección del flujo cerca al fondo y la ocurrencia del fenómeno de separación de la capa límite, lo que permite analizar las dos zonas principales en los escalones: separación y readherencia del flujo. Los vectores velocidad en estas dos zonas se ilustran en la Figura 8a para el escalón G en la curva cóncava, y se colorean en función de la relación entre la magnitud de la velocidad (U) y la máxima velocidad en todo el canal (U_{max}). En la Figura

8c se grafica la variación de U_x normalizada por la máxima velocidad positiva en x en el mencionado escalón (U_{x-max}) a lo largo del eje x_l/l . Este último representa la fracción de longitud de la huella, y se calcula como la relación entre la distancia horizontal a la contrahuella (x_l) y la longitud total de la huella. La zona de separación se compone en el tramo inicial de un vórtice de recirculación pequeño (VRP), que se muestra en detalle en la Figura 8b. Allí, U_x/U_{x-max} es positivo en el fondo (ver ampliación en la Figura 8c), y a continuación hay un vórtice grande (VRG) con U_x/U_{x-max} negativo. La zona de readherencia inicia justo aguas abajo del punto de readherencia del flujo (PRF), donde la corriente principal impacta con la huella y continúa hacia aguas abajo en el mismo sentido del eje x_l/l .

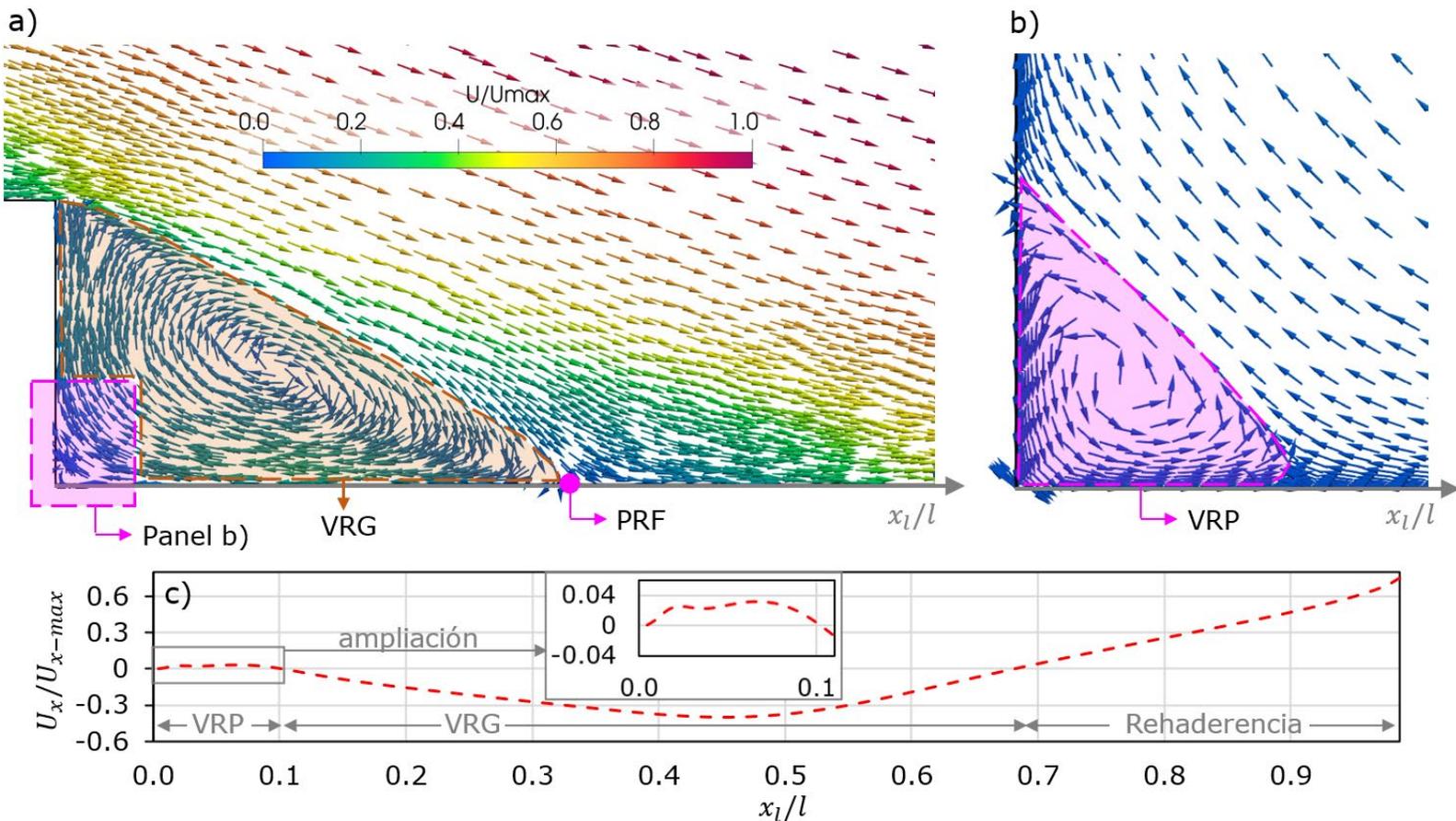


Figura 8. a) Vectores velocidad del flujo; b) detalle del VRP; c) U_x/U_{x-max} a lo largo de la huella, a una distancia del fondo de $2.50E-06$ m. Resultados correspondientes al escalón G.

Las velocidades en la zona de separación son las más bajas, correspondientes a menos del 20 % de U_{max} , y en la de readherencia son mayores aumentando hasta un 40 %. Las máximas velocidades del flujo se dan por encima del pseudofondo en la corriente principal (> 40 % de U_{max}), similar a los resultados de Arjenaki y Sanayei (2020) para un canal escalonado 3D modelado también con RNG $k - \varepsilon$.

La existencia de las zonas de separación y readherencia fue discutida previamente por Chanson (1994) y Llano (2003), quienes identificaron tres subregímenes de flujo rasante. El SK1 para $h/l < 0.27$, en el cual la frontera exterior del VRG impacta en la zona intermedia de la huella y que corresponde al mostrado en la Figura 8. El SK2 para $0.27 < h/l < 0.47$, en el cual los vórtices de recirculación de escalones adyacentes interactúan entre sí y ocupan la totalidad de las huellas (las zonas de readherencia desaparecen). Finalmente, el SK3 para $h/l > 0.47$, en el cual la zona de separación se compone de vórtices más estables y ocupa también todo el escalón, pero sin interactuar con el flujo de escalones vecinos. Los resultados de la Figura 8 concuerdan con los vectores de velocidad reportados por Medhi *et al.* (2019) para el VRG, sin embargo, estos no reportan el VRP. En la Figura 8a se evidencia la proximidad de este a la pared, por lo que la resolución de la malla cerca al escalón, $y^+ \sim 1$ en este estudio vs. $30 < y^+ < 300$ en el de Medhi *et al.* (2019) es una posible explicación de las condiciones numéricas necesarias para capturarlo. Wang, Wu y Zhu (2019) mostraron la existencia de este vórtice experimentalmente mediante velocimetría de imagen de partículas (PIV), y encontraron un buen ajuste numérico mediante simulación numérica directa y LES, pero un vórtice más pequeño mediante $k - \varepsilon$. Por lo tanto, el modelo de turbulencia seleccionado también puede influir en la representación adecuada y captura de este fenómeno del flujo.

Para la totalidad de los escalones seleccionados (A-G en la Figura 4), en las Figuras 9a y 9b se muestra la variación de $(\partial P / \partial x)_{pared}$ y de la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ε_{pared}),

respectivamente, a lo largo de x_l/l . Lo anterior, para analizar la fracción de los escalones ocupada por la región de vórtices vs. la de flujo readherido, y la diferencia en la distribución de la disipación en esas regiones, haciendo énfasis en la comparación de dichas características entre la curva convexa, el tramo recto y la curva cóncava. En la Figura 9a, para los menores valores de x_l/l se observa un primer gradiente de presión favorable ($(\partial P/\partial x)_{pared} < 0$), identificado como la zona de influencia del vórtice pequeño (ZI-VRP). El sentido positivo del flujo en la huella respecto al eje x_l/l , que hace que el VRP gire en sentido antihorario (ver Figura 8b), se debe al signo del gradiente de presión y se extiende desde la contrahuella hasta aproximadamente el punto de $(\partial P/\partial x)_{pared}$ mínimo de la ZI-VRP. Como referencia, nótese que para G esto es en $x_l/l \approx 0.1$, valor hasta el que efectivamente U_x/U_{x-max} es positivo en la Figura 8c. Aguas abajo, el tramo restante del gradiente favorable es el responsable de que el flujo cerca del fondo del VRG disminuya su velocidad en el sentido negativo de x_l/l . En la región intermedia de la huella se encuentra el gradiente de presión adverso ($(\partial P/\partial x)_{pared} > 0$), identificado como la zona de influencia del vórtice grande (ZI-VRG). El signo del gradiente de presión produce un sentido del flujo en la pared contrario al eje x_l/l y el consecuente giro del VRG en sentido horario.

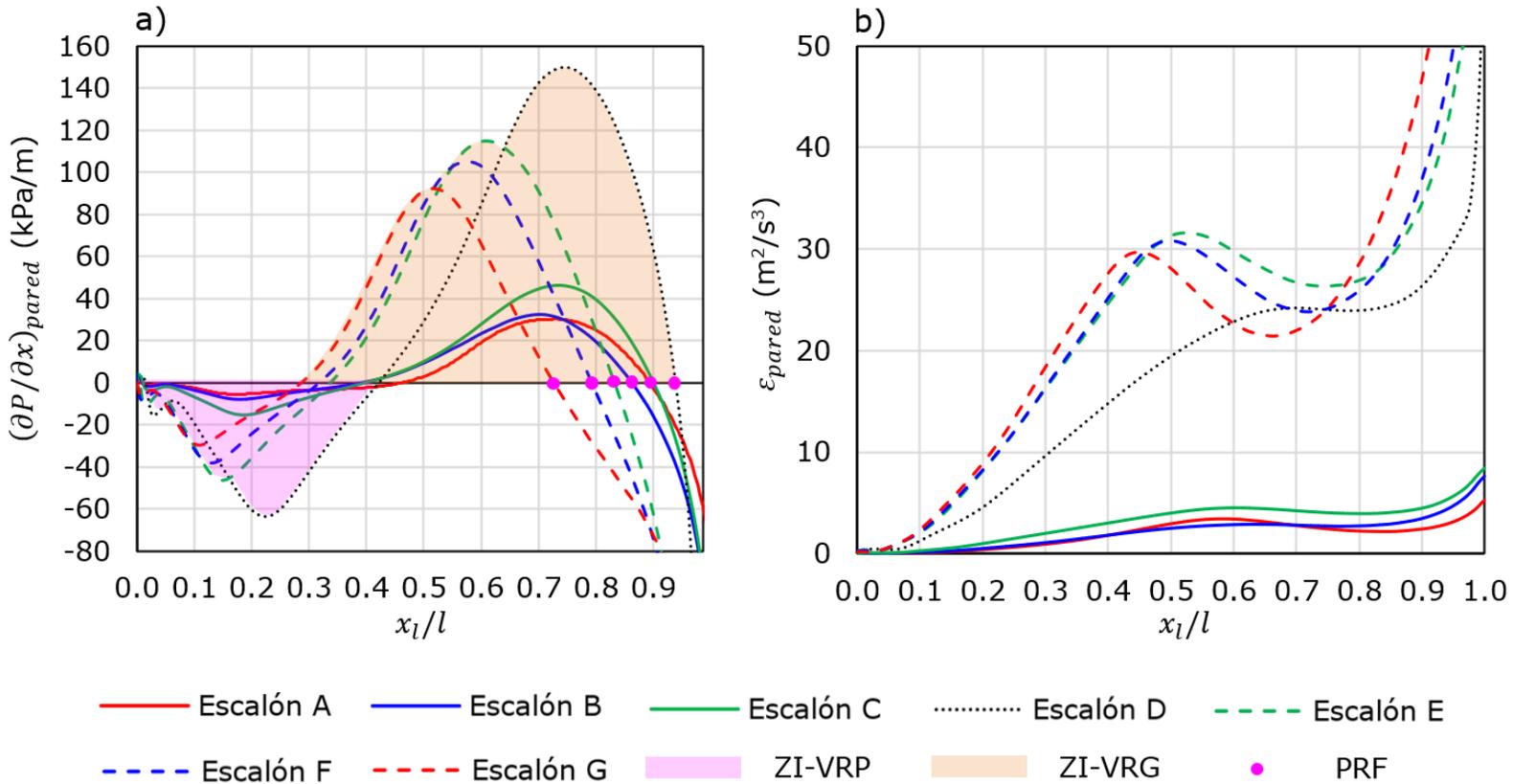


Figura 9. Variación a lo largo de la huella de: a) gradiente de presión, b) disipación. Curva convexa (escalones A, B y C), tramo recto (escalón D) y curva cóncava (escalones E, F y G).

La unión de la ZI-VRP y la ZI-VRG conforma la zona de separación del flujo, que se extiende aproximadamente hasta que $\partial P/\partial x_{pared}$ cruza el eje x_1/l por segunda vez en el PRF. Como referencia, nótese que para G esto es en $x_1/l \approx 0.7$, valor en el que efectivamente U_x/U_{x-max} se hace cero en la Figura 8c. El cambio del gradiente de adverso a favorable produce un punto de estancamiento del flujo, y el inicio de la zona de readherencia que va hasta $x_1/l = 1$. Los resultados de la Figura 9a coinciden con los de Zhan *et al.* (2016) y de Saqib *et al.* (2022), quienes también encontraron

valores de presión decreciente en el sentido de x_l/l en ambos extremos de la huella, y creciente en la zona intermedia. Los primeros autores, así como el presente estudio, asociaron el punto de máxima presión en la huella (que coincide con el segundo cruce de $(\partial P/\partial x)_{pared}$) con la ubicación aproximada del PRF.

En la Tabla 2 se presenta un análisis comparativo de la ocupación de los escalones en las curvas verticales y en el tramo recto por los vórtices de la zona de separación y por la zona de readherencia.

Tabla 2. Análisis comparativo de las zonas de separación y readherencia del flujo en las curvas verticales y el tramo recto.

Escalones A, B y C (región curva convexa)	Escalón D (región tramo recto)	Escalones E, F y G (región curva cóncava)
Zona de separación del flujo		
Los valores mínimo y máximo de $(\partial P/\partial x)_{pared}$ aumentan en el sentido del flujo (A→B→C). Además, son los menores respecto a las otras dos regiones	Zona con los mayores valores mínimo y máximo de $(\partial P/\partial x)_{pared}$.	Los valores mínimo y máximo de $(\partial P/\partial x)_{pared}$ disminuyen en el sentido del flujo (E→F→G). Sus magnitudes son intermedias respecto a las otras dos regiones.
Aproximadamente del 15 al 20 % de la huella es ocupada por el VRP. Su ocupación aumenta en el sentido A → B → C	Un poco más del 20 % de la huella es ocupada por el VRP. Ocupa una mayor fracción que en las curvas verticales	Aproximadamente del 10 al 15 % de la huella es ocupada por el VRP (menor que en las otras dos regiones). Su ocupación disminuye en el sentido E → F → G
El PRF se sitúa aproximadamente del 85 al 90 % de la huella. En el sentido A → B → C, la distancia relativa a la contrahuella, x_l/l , parece variar de forma aleatoria	El PRF se sitúa aproximadamente en el 95% de la huella. x_l/l es mayor que en las curvas verticales	El PRF se sitúa aproximadamente del 70 % a un poco más del 80 % de la huella; x_l/l es la menor respecto a las otras dos regiones, aproximándose más a la contrahuella en el sentido E → F → G
Zona de readherencia del flujo		
Ocupa aproximadamente del 10 al 15 % de la huella	Ocupa aproximadamente el 5 % de la huella. Su ocupación es la menor	Ocupa aproximadamente del 20 al 30 % de la huella. Su ocupación es la mayor

El escalón D con h/l de 1 corresponde, según Llano (2003), a un subrégimen SK3. Corresponde con lo presentado en la Tabla 2, ya que la zona de separación ocupa aproximadamente la totalidad de la huella, pero sin interferir con el vórtice del escalón subsiguiente. La relación h/l de los escalones en la curva convexa A, B y C es 0.32, 0.43 y 0.53, respectivamente, igual a la de los escalones correspondientes en la curva cóncava G, F y E. Según Llano (2003), corresponden a subregímenes SK2 y SK3. Sin embargo, los resultados numéricos corresponden a un SK1, con una zona de readherencia claramente diferenciada. Se demuestra que los rangos de los subregímenes propuestos en la literatura originalmente para tramos rectos se ven afectados en curvas verticales por la forma de las líneas de corriente. En la curva cóncava, las fuerzas dinámicas producidas en el fondo por la reducción de la pendiente comprimen la zona de separación de forma progresiva de un escalón a otro en el sentido $E \rightarrow F \rightarrow G$, generando las menores fracciones de ocupación del VRG y del VRP. El efecto contrario ocurre en la curva convexa en la que las líneas de corriente tienen una tendencia a alejarse del fondo, produciendo una mayor ocupación de la zona de separación y sus vórtices.

El comportamiento de las líneas de corriente también incide en la tasa de disipación turbulenta. En la Figura 9b se muestra que su distribución a lo largo de la huella presenta menor magnitud en la curva convexa, y aumenta aguas abajo conforme el flujo ejerce mayores fuerzas dinámicas en los escalones (es mayor en el tramo recto y finalmente máxima en la curva cóncava). La disipación de energía en el flujo rasante está asociada con las zonas de separación y readherencia. Los vórtices en la primera zona se mantienen por la transferencia de esfuerzos cortantes

turbulentos desde la corriente sobre el pseudofondo, y son los primeros responsables de extraer energía al flujo. En la segunda zona, la fricción del flujo readherido con la pared genera la disipación de energía (Chanson, 1994). Las distribuciones de ε_{pared} en la Figura 9b concuerdan con esto. Todas las curvas empiezan en un valor mínimo en la zona del VRP que no aporta a la disipación y crecen en el sentido del eje x_l/l hasta un primer máximo, cuya ubicación coincide aproximadamente con la del máximo gradiente adverso de presión (Figura 9a) en la región intermedia del VRG. Finalmente, para el valor de x_l/l correspondiente al PRF, ε_{pared} comienza a crecer a una mayor tasa, y en el borde del escalón alcanza los valores máximos en toda la huella. Esto demuestra que cerca al fondo la mayor disipación turbulenta se da en la zona de readherencia.

Ashoor y Riazi (2019) encontraron resultados similares para la comparación de un canal escalonado cóncavo y uno convexo. La mayor disipación en el primero la asociaron solo con los vórtices de recirculación. Al respecto, aunque en el presente estudio también se obtiene que los VRG con mayor ε_{pared} son los de la curva cóncava, se resalta además el aporte de la máxima disipación debida a la fricción con el fondo en el tramo final de las huellas. Nótese que en el sentido $E \rightarrow F \rightarrow G$, ε_{pared} máximo en el VRG disminuye, mientras que en la zona de readherencia la disipación aumenta escalón a escalón.

Para completar el análisis de la distribución de las variables a lo largo de la huella, se presentan a continuación perfiles en secciones perpendiculares a esta. Se seleccionan para comparación los escalones A y G de igual geometría en las curvas 1 y 2. En estos, la sección perpendicular 1 (S_1) se ubica en x_l/l del mínimo $\partial P/\partial x_{pared}$ en la ZI-VRP;

la sección 2 (S_2), en x_l/l del máximo $\partial P/\partial x_{pared}$ en la ZI-VRG, y la sección 3 (S_3) está en x_l/l del segundo cruce de $\partial P/\partial x_{pared}$ (aproximadamente en el PRF). En las Figuras 10a, 10b y 10c se muestran los perfiles de magnitud de velocidad, presión y disipación en S_1 , S_2 y S_3 , respectivamente.

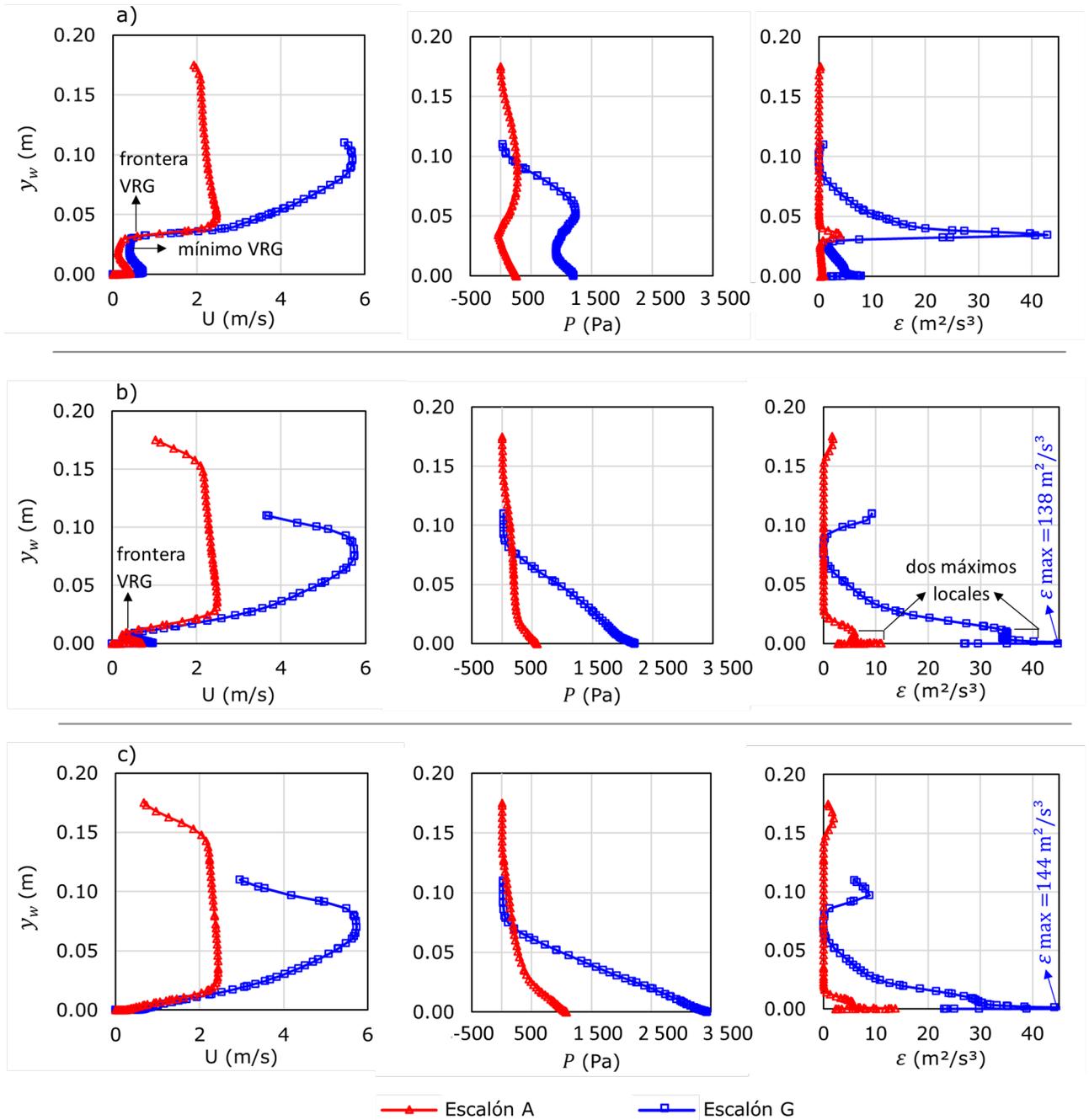


Figura 10. Comparación entre la curva convexa (escalón A) y la cóncava (escalón G) de los perfiles de magnitud de velocidad, presión estática y tasa de disipación en: a) S1, b) S2 y c) S3.

En la Tabla 3 se presentan los valores de x_l/l en los que se generaron los perfiles verticales, junto con un diagrama de referencia para mayor comprensión de su ubicación.

Tabla 3. Localización x_l/l en los escalones A y G de las secciones S1, S2 y S3.

Escalones	x_l/l de S1	x_l/l de S2	x_l/l de S3
Escalón A	0.20	0.70	0.90
Escalón G	0.10	0.52	0.73

Los perfiles de magnitud de velocidad en la zona de separación tanto en la ZI-VRP (Figura 10a) como en la ZI-VRG (Figura 10b) presentan dos máximos locales. El primero, de menor magnitud, ocurre cerca de la huella donde el flujo recirculante se mueve paralelo al fondo. Posteriormente, la velocidad comienza a aumentar a una mayor tasa en la frontera de la zona de separación con la corriente principal sobre el pseudofondo (“frontera VRG” en la Figura 10a y 10b). La distancia y_w a

esta frontera es menor en S_2 que en S_1 , ya que el VRG se va achatando a mayor proximidad al PRF. El segundo máximo, de mayor magnitud, tiene lugar en la corriente principal y ocurre más cerca de la zona de separación en la curva convexa (escalón A), mientras que más cerca de la superficie libre en la curva cóncava (escalón G). Este comportamiento se asocia con la ubicación de las curvas 1 y 2, pues en la primera la capa límite no ha interceptado la superficie libre, por lo que el flujo de la corriente principal presenta un perfil aproximadamente uniforme. En la segunda sí la intercepta, por lo que la velocidad continúa creciendo a mayor distancia y_w , y decrece finalmente en la superficie libre por la fricción con el aire atmosférico.

Iniciando la zona de readherencia (Figura 10c) solo se presenta el valor máximo de magnitud de velocidad asociado con la corriente sobre el pseudofondo, pues desaparece el asociado con la zona de vórtices. Cabe resaltar que la magnitud de la velocidad es mayor en toda la altura del flujo en la curva cóncava para S_1 , S_2 y S_3 debido a que se encuentra más cerca de la descarga final, donde la energía potencial del flujo en la cresta del canal se ha convertido en energía cinética. Al comparar con los campos de velocidad reportados por Ashoor y Riazi (2019) hay múltiples coincidencias. Dichos autores mostraron también el máximo local en la zona de separación cerca a la huella y luego un mínimo en el centro del VRG ("mínimo VRG" en la Figura 10a del presente estudio). Además, en sus modelaciones, el máximo local cerca de la superficie libre también aparece en el tramo final del canal escalonado.

En la Figura 10a se presentaron dos valores máximos de la presión para los peldaños de ambas curvas: el primero en el fondo del canal en

la zona de separación y el segundo en la corriente principal a mayor distancia y_w para el escalón A que para el G. Ambos máximos son mayores en la curva cóncava. Esta forma de los perfiles fue reportada también experimental y numéricamente por Saqib *et al.* (2022). Por otro lado, en la curva convexa se presentan valores negativos de presión manométrica, que coinciden con la esquina superior de la contrahuella $y_w \sim (h = 0.038 \text{ m})$. Las presiones de succión en los bordes de los escalones han sido también reportadas por Sarkardeh *et al.* (2015). Nótese que en esta misma ubicación el mínimo local en la curva cóncava dista de ser negativo. En S_2 (Figura 10b) no hay presiones de succión y el mínimo local en la zona de separación es imperceptible en ambos escalones, para desaparecer por completo en la zona de readherencia (Figura 10c). En general, las mayores presiones en el escalón G en toda la profundidad del flujo están asociadas con el comportamiento descrito previamente de las líneas de corriente en las curvas verticales: tienden a alejarse del fondo en la convexa, pero a comprimirlo en la cóncava.

Por último, los tres perfiles verticales de disipación en la curva cóncava son mayores que en la convexa, lo cual confirma los resultados de la Figura 9b. La geometría de la curva vertical correspondiente al escalón G, sumado a que recibe el flujo a gran velocidad que ha caído por la rampa escalonada, propicia el aumento de los esfuerzos cortantes entre el flujo y el fondo, y entre las mismas capas de fluido. Este incremento en la tasa de disipación a medida que el flujo avanza por los escalones hasta lograr los valores máximos en las abscisas finales del canal también se evidenció en el campo de disipación reportado por Bombardelli *et al.* (2011).

En la Figura 10a, en la ZI-VRP se observan dos máximos locales de ε en cada perfil, uno menor cerca al fondo debido a los gradientes de velocidad entre el flujo recirculante y la pared, y otro mayor que coincide con la frontera superior del VRG, y que se debe a los gradientes de velocidad entre el vórtice y la corriente sobre el pseudofondo. En S_2 , donde el vórtice de recirculación se achata y su frontera se acerca a la pared, los dos máximos de cada perfil están tan cercanos que parecen fusionarse en uno solo (“dos máximos locales” en la Figura 10b). El máximo de ε a lo largo de la frontera de la zona de separación con el flujo principal se observa en los mencionados resultados de Bombardelli *et al.* (2011), quienes, sin embargo, reportaron una disipación nula cerca del fondo. Teniendo en cuenta que los autores utilizaron funciones de pared como condición de frontera para la turbulencia, las cuales permiten modelar el flujo a partir de la zona logarítmica, esto puede sugerir la importancia de modelar la región más cercana de la capa límite, a fin de capturar los máximos valores de ε debidos a la fricción con la huella. Aun así, se recomienda profundizar la investigación al respecto.

Iniciando en la zona de readherencia, la disipación máxima se logra solo por la fricción con el fondo sólido, lo que evidencia un único máximo en ambos escalones. Nótese que tanto en esta zona (Figura 10c) como en la de máximo gradiente adverso de presión (Figura 10b), los valores máximos de disipación para el escalón G son 144 y 138 m^2/s^3 , respectivamente; sin embargo, las gráficas se interrumpen en 45 m^2/s^3 para lograr una mejor visualización de los máximos del escalón A. Cabe resaltar que para los tres perfiles en los escalones A y G, los máximos

locales de ε cerca de la superficie libre del flujo son producidos por los gradientes de velocidad presentes en la interfase agua-aire.

Vorticidad y energía cinética turbulenta en el canal con curvas verticales escalonadas

La magnitud de la vorticidad ($|\omega_i|$) se calcula considerando solo la componente en la dirección z (ω_z), ya que por tratarse de un modelo 2D, $\omega_x = \omega_y = 0$. Se utiliza entonces la Ecuación (14):

$$|\omega_i| = \sqrt{\omega_z^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}\right)^2} \quad (14)$$

La Figura 11a presenta el campo de $|\omega_i|$ en todo el canal escalonado, para comparar su comportamiento en la zona de separación y readherencia de las curvas cóncava y convexa, y del tramo recto. En general, las zonas de máxima vorticidad coinciden con la superficie libre y con el pseudofondo. La primera corresponde a los gradientes de velocidad entre el flujo de agua y el aire; la segunda, a los gradientes entre la corriente principal y las zonas de recirculación en las cavidades de los escalones. La Figura 11b muestra una ampliación del campo en la curva convexa con un detalle del escalón A. En la zona de separación de este último, la máxima vorticidad se observa alrededor de la línea de corriente en la frontera del vórtice de recirculación grande (línea punteada FVRG) con el flujo principal, que intercepta la huella en el PRF. Esta zona de altos gradientes es responsable de la producción de turbulencia y de

los máximos de disipación mostrados previamente en los paneles correspondientes de las Figuras 10a y 10b. En la zona del VRP se observa otra región de alta vorticidad, correspondiente a los gradientes de velocidad en la frontera con el VRG que gira en sentido contrario. Aguas abajo del PRF, la zona de alta vorticidad se da por los gradientes generados por la fricción del flujo con la huella; allí se encuentra la máxima vorticidad en los escalones, la cual se extiende hasta aguas abajo del extremo derecho de la huella en el inicio de la zona de separación del escalón subsiguiente. Este comportamiento coincide con los resultados experimentales de Amador, Sánchez-Juny y Dolz (2006), quienes aplicaron una técnica de velocimetría de imagen de partículas para obtener el campo de flujo en un canal escalonado con pendiente 1V:0.8H. Los máximos valores de vorticidad reportados en ese estudio ocurren también justo aguas abajo de los bordes exteriores de los escalones, en una región de bajo espesor relativo. Este fenómeno es atribuido, según los mencionados autores, a la aparición rápida de vórtices de pequeña escala que se desprenden de estas esquinas.

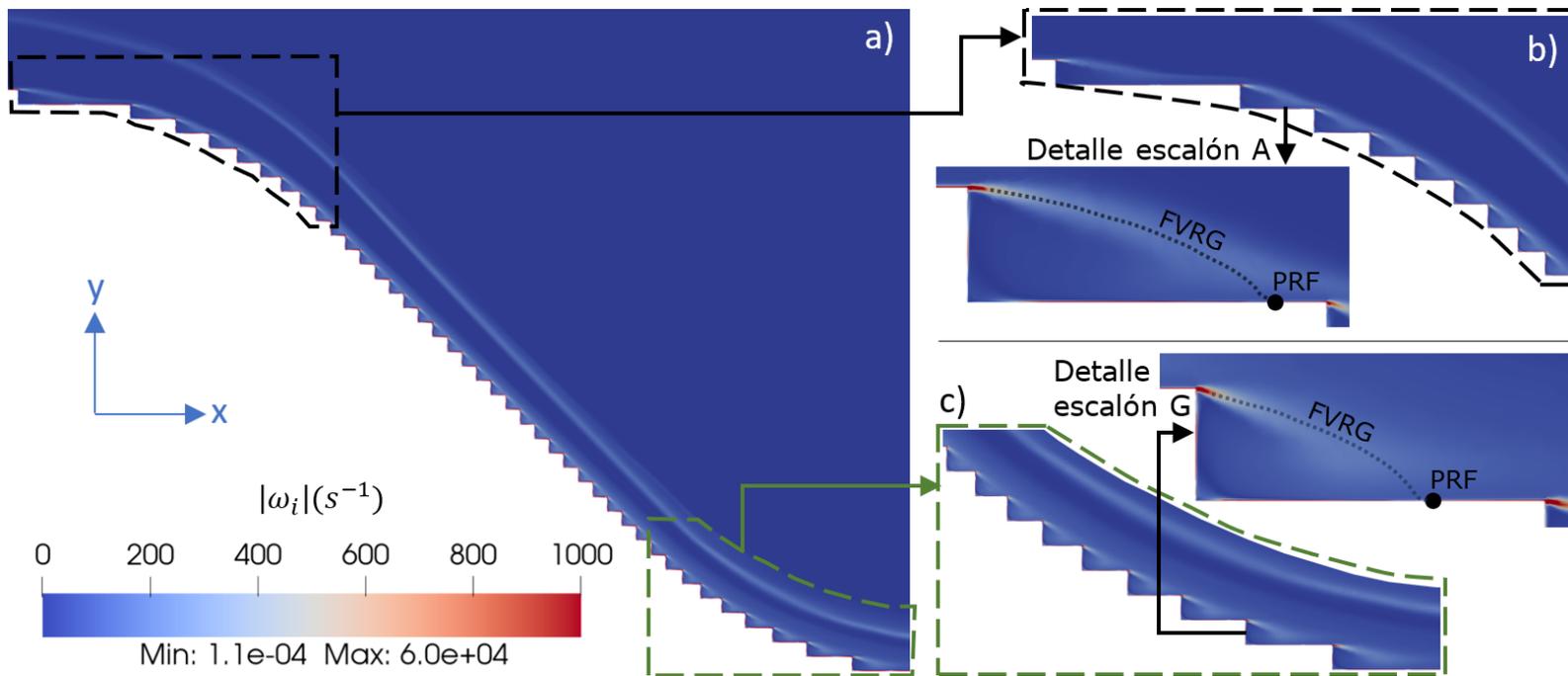


Figura 11. Campo de magnitud de la vorticidad $|\omega_i|$ en: a) todo el canal con curvas verticales; b) la curva convexa con detalle del escalón A; c) la curva cóncava con detalle del escalón G.

El patrón del campo de vorticidad descrito para las cavidades de la curva 1 se replica en las del tramo recto y en las de la curva 2. La principal diferencia radica en la ubicación de la intersección con la huella de la zona de alta $|\omega_i|$ alrededor de la FVRG. En la rampa recta, los máximos niveles de vorticidad se extienden entre bordes externos de escalones consecutivos, similar a los resultados de Amador *et al.* (2006). Esto se atribuye a la pendiente, correspondiente a un subrégimen SK3, con la zona de separación que ocupa aproximadamente la totalidad de la huella. La Figura 11c muestra una ampliación de la curva cóncava con un detalle del escalón G. La principal diferencia con la curva convexa es que la zona

de alta $|\omega_i|$ intercepta en el PRF más aguas arriba, lo cual se debe a una menor ocupación de la zona de separación. Sumado a lo anterior, la máxima vorticidad de todo el canal en los bordes exteriores se da en esta curva final y es aproximadamente $6.0e + 04s^{-1}$ (nótese que este máximo se especifica bajo la leyenda de barra de colores de la Figura 11, que se interrumpe en $1\ 000\ s^{-1}$ para una mejor visualización del campo).

La Figura 12a presenta el campo de k en todo el canal escalonado. En general, los máximos niveles de turbulencia se dan cerca del pseudofondo, lo cual confirma el rol de los altos gradientes de velocidad que se evidenciaron en el campo de vorticidad alrededor de la FVRG, como una zona de alta producción de k . La región ocupada por los máximos valores de k se expande hacia la superficie libre en la dirección del flujo, similar a lo evidenciado en los resultados de Amador *et al.* (2006) y Bombardelli *et al.* (2011), quienes lo atribuyeron al desarrollo de la capa límite. Esto se puede confirmar en la Figura 11a, en la que se observa la expansión aguas abajo de la zona de máximos gradientes de velocidad, haciendo que a mayor distancia de la cresta del canal aumente la fracción de la profundidad del flujo que contribuye a la producción de turbulencia. Al comparar los detalles de las curvas convexa y cóncava, en las Figuras 12b y 12c, respectivamente, se observan los mayores valores de k en la segunda. Respecto a la diferencia entre las zonas de separación y readherencia, en ambas curvas está la mayor turbulencia en la zona de impacto de la corriente principal con la fracción final de la huella.

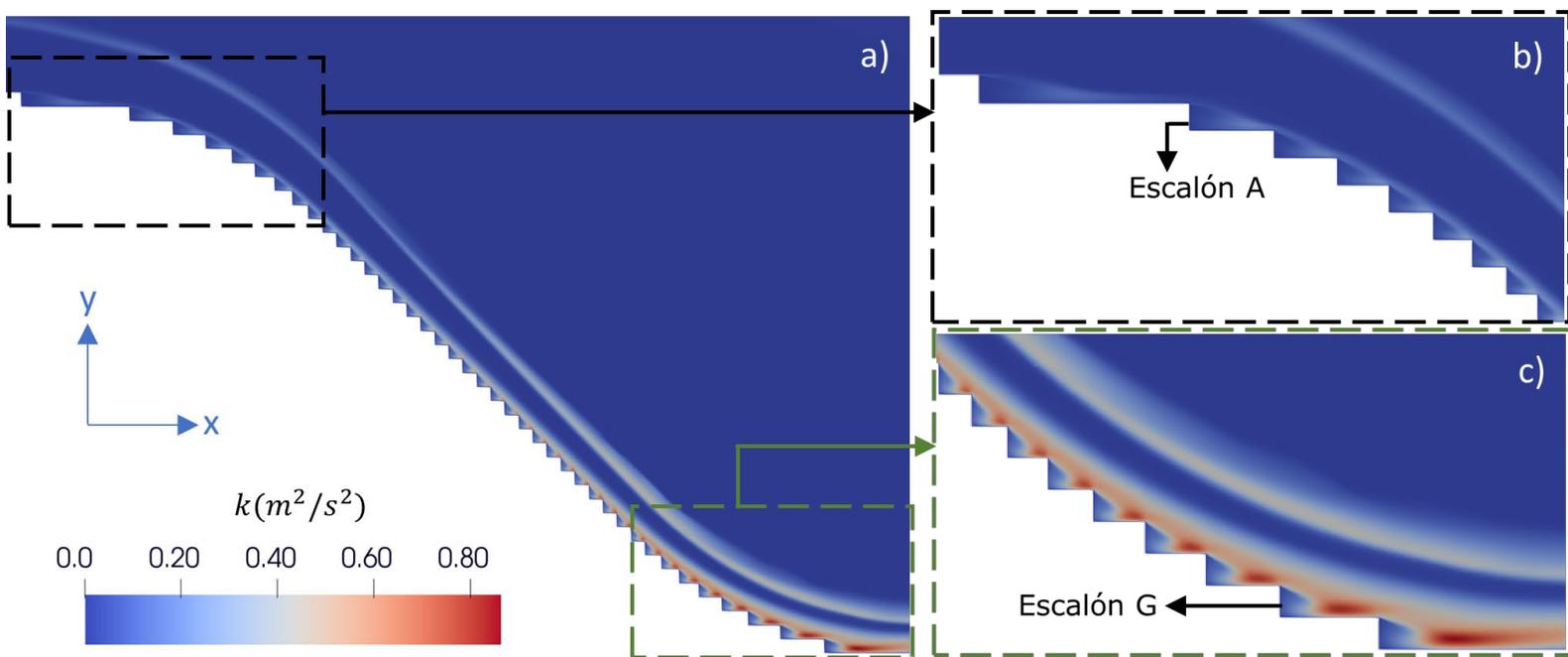


Figura 12. a) Campo de energía cinética turbulenta k en todo el canal con curvas verticales, b) detalle de la curva convexa, c) detalle de la curva cóncava.

Conclusiones

El modelo RNG $k - \varepsilon$ captura de forma adecuada los perfiles experimentales de velocidad en la zona de flujo no aireado, obteniéndose un error promedio máximo por perfil de 5 %. Aguas abajo del punto de inyección de aire —aunque los perfiles numéricos capturan la forma de los experimentales— el error promedio es mayor y la calidad del ajuste disminuye en la dirección del flujo. Cerca del fondo —en una capa de espesor aproximado de 26 % de h — se subestiman las mediciones de velocidad, mientras que más lejos se sobrestiman. El aumento del error en esta región está relacionado con que el modelo numérico no captura

el fenómeno de aireación. En la literatura se encuentra que la mejor opción para modelar el atrapamiento de aire por la perturbación turbulenta de la superficie libre es aplicar el modelo de turbulencia LES. Se recomienda profundizar la investigación utilizando dicha técnica de simulación, por ejemplo en una curva cóncava escalonada que por ubicarse en la descarga del canal es más propensa a coincidir con el flujo aireado.

Los objetivos propuestos para este estudio buscaban establecer la fracción de los escalones ocupada por la región de vórtices y de flujo readherido, y definir la diferencia en la distribución de la velocidad, la presión, la vorticidad y las estadísticas de la turbulencia en dichas zonas. Lo anterior, con el fin de comparar la hidrodinámica del flujo en los tres tramos del canal: curva convexa, rampa recta y curva cóncava. A continuación se enumeran las conclusiones derivadas de los resultados de este trabajo y que dan por cumplidos los objetivos:

1. Mediante la modelación numérica del presente estudio en el canal con curvas verticales se lograron capturar dos zonas principales en cada escalón: la de separación y la de readherencia. En la primera se observan dos vórtices de recirculación: uno grande girando en sentido horario y uno pequeño en la esquina interior de los escalones girando en sentido antihorario. En la zona de readherencia, el flujo principal impacta en la fracción final de la huella y fluye hasta el siguiente escalón. En la curva cóncava, las velocidades obtenidas en la zona de separación son más bajas, correspondientes a menos del 20 % de la velocidad máxima en el canal, y en la de readherencia son mayores y se elevan hasta un 40 %.

2. El vórtice pequeño ocupa una fracción menor de la huella en la curva cóncava que en la convexa, y mientras que en la primera la fracción de ocupación disminuye escalón a escalón en el sentido del flujo en la curva, en la segunda aumenta. Por otro lado, el punto de readherencia está más cerca de la contrahuella en la cóncava, por lo que la zona de readherencia ocupa una mayor fracción del escalón. Lo anterior es porque en la salida del canal, las fuerzas dinámicas producidas en el fondo por la reducción de la pendiente comprimen la zona de separación. El efecto contrario ocurre en la curva a la entrada del canal, en la que las líneas de corriente tienen una tendencia a alejarse del fondo.
3. En la zona de separación cercana a la contrahuella de los escalones de las curvas cóncava y convexa se encuentran dos máximos locales de presión: uno cerca del fondo en la zona de recirculación, y otro en la corriente principal por encima del pseudofondo. En el medio se presenta un mínimo local, negativo solo en la curva convexa y ubicado aproximadamente a la altura de la esquina superior de la contrahuella. En la zona de separación cercana al punto de readherencia y en la zona de readherencia, este mínimo local desaparece en ambas curvas escalonadas, lo que resulta en una presión máxima en el fondo del canal, que disminuye en función de la distancia a la pared. Los perfiles analizados mostraron en general que en toda la profundidad del flujo la presión es mayor en la curva cóncava que en la convexa.
4. Respecto a la disipación de energía cinética turbulenta, se evidencia que el vórtice pequeño no genera un aporte significativo a esta

variable en ningún escalón del canal. Cerca del fondo, la disipación ocurre sobre todo en el vórtice de recirculación grande y en la zona de readherencia. En esta última es mayor a lo largo de todo el canal y es producida por la fricción del flujo con el último tramo de cada escalón. Similar a lo concluido para la presión, en la dirección perpendicular a la huella de ambas curvas verticales, en la zona de separación se encuentran dos máximos locales de disipación. Un máximo cerca del fondo debido a los gradientes de velocidad entre el flujo recirculante y la pared, y otro mayor que coincide con la frontera superior de la zona de separación, y que se debe a los gradientes de velocidad entre el vórtice y la corriente sobre el pseudofondo. Estos dos máximos se aproximan hasta fundirse en uno solo conforme el vórtice grande se achata cerca al punto de readherencia. Por último, los perfiles analizados mostraron en general que en toda la profundidad del flujo la disipación turbulenta es mayor en la curva cóncava que en la convexa.

5. La máxima vorticidad en la zona de separación de los escalones se da alrededor de las fronteras entre la corriente principal y el vórtice grande, y entre este último y el vórtice pequeño. En la zona de flujo readherido, la magnitud es mayor y se da por los gradientes de velocidad generados por la huella. Allí, la zona de máximos se extiende aguas abajo hasta el inicio de la zona de separación del escalón subsiguiente. La magnitud de la vorticidad aumenta en la dirección del flujo, y los valores máximos están cerca de las esquinas exteriores de los escalones de la curva cóncava.

6. Las zonas de alta vorticidad asociadas con altos gradientes en el flujo se correlacionaron con regiones de producción de energía cinética turbulenta. Los máximos niveles de k se localizaron entonces alrededor del pseudofondo para la zona de separación, y sobre la huella para la zona de readherencia, siendo mayores en esta última. Tanto la magnitud de k como la fracción de la profundidad abarcada por altos niveles de turbulencia aumentaron en la dirección del flujo y encontraron sus máximos valores en la curva cóncava a la salida del canal.

Referencias

- Amador, A., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2006). Characterization of the nonaerated flow region in a stepped spillway by PIV. *Journal of Fluids Engineering*, 128(6), 1266. DOI: 10.1115/1.2354529
- Ansys Inc. (2022). *ANSYS Fluent User's Guide* (Vol. 2022 R2).
- Arjenaki, M. O., & Sanayei, H. R. Z. (2020). Numerical investigation of energy dissipation rate in stepped spillways with lateral slopes using experimental model development approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 605-616. DOI: 10.1007/S40808-020-00714-Z/METRICS
- Ashoor, A., & Riazi, A. (2019). Stepped spillways and energy dissipation: A non-uniform step length approach. *Applied Sciences*, 9(23), 5071. DOI: 10.3390/app9235071

- Attari, J., & Sarfaraz, M. (2012). Transitional steps zone in steeply sloping stepped spillways. *9th International Congress on Civil Engineering*, 9. Recuperado de <https://civilica.com/doc/165678/certificate/print/>
- Boes, R. M., & Hager, W. H. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661-670. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661)
- Bombardelli, F. A., Meireles, I., & Matos, J. (2011). Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. *Environmental Fluid Mechanics*, 11(3), 263-288. DOI: 10.1007/S10652-010-9188-6/METRICS
- Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams* (3rd ed.). Washington, DC: US Government Printing Office. Recuperado de <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/SmallDams.pdf>
- Casa, E., Hidalgo, X., Castro, M., Ortega, P., & Vera, P. (2018). Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante el uso de Flow-3D. *Revista Politécnica*, 41(2), 53-64. Recuperado de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/823
- Chahed, J., Roig, V., & Masbernat, L. (2003). Eulerian-Eulerian two-fluid model for turbulent gas-liquid bubbly flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 29(1), 23-49. DOI: 10.1016/S0301-9322(02)00123-4

- Chanson, H. (1994). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 32(3), 445-460. DOI: 10.1080/00221689409498745
- Chanson, H. (2001). Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. *Dam Engineering*, 11(4), 205-242.
- Chanson, H., & Toombes, L. (2004). Hydraulics of stepped chutes: The transition flow. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 43-54.
- Cheng, X., Luo, L., Zhao, W., & Li, R. (2004). Two-phase flow simulation of aeration on stepped spillway. *Progress in Natural Science*, 14(7), 626-630. DOI: 10.1080/10020070412331344051
- Chinnarasri, C., & Wongwises, S. (2006). Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(1), 70-76. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:1(70)
- Cifani, P., Michalek, W. R., Priems, G. J. M., Kuerten, J. G. M., van der Geld, C. W. M., & Geurts, B. J. (2016). A comparison between the surface compression method and an interface reconstruction method for the VOF approach. *Computers & Fluids*, 136, 421-435. DOI: 10.1016/J.COMPFLUID.2016.06.026
- Dalili-Khanghah, K., & Kavianpour, M. R. (2020). Numerical investigation of the effect of CEDEX profile on the hydraulic parameters in the stepped spillway and the performance of this profile in various chute slopes. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 44(4), 1247-1254. DOI: 10.1007/S40996-019-00313-8/FIGURES/8

- Escue, A., & Cui, J. (2010). Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows. *Applied Mathematical Modelling*, 34(10), 2840-2849. DOI: 10.1016/J.APM.2009.12.018
- Gonzalez, C. A. (2005). *An experimental study of free-surface aeration on embankment stepped chutes*. Recuperado de <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:158019>
- Greenshields, C. (2022). *OpenFOAM v10 User Guide*. London, UK: The OpenFOAM Foundation. Recuperado de <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v10>
- Greenshields, C., & Weller, H. (2022). *Notes on computational fluid dynamics: General principles*. Reading, UK: CFD Direct Ltd. Recuperado de <https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/index/>
- Henrique-Povh, P., & Junji-Ota, J. (2019). Transition stretch of spillways with bevelled steps. *38th IAHR World Congress - 'Water: Connecting the World'*, 38, 1520-1528. DOI: 10.3850/38WC092019-1065
- Hirt, C. W. (2003). Modeling turbulent entrainment of air at a free surface. *Technical Note 61(FSi-03-TN61)*. Pasadena, USA: Flow Science Inc.
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5

- Hunt, S., & Kadavy, K. (2010a). Energy dissipation on flat sloped stepped spillways: Part 1. Upstream of the inception point. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53(1), 103-109.
- Hunt, S., & Kadavy, K. (2010b). Energy dissipation on flat sloped stepped spillways: Part 2. Downstream of the inception point. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53(1), 111-118.
- Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2012). *Fluid Mechanics* (5th ed.). Oxford, UK: Elsevier Inc. DOI: 10.1016/C2009-0-63410-3
- Llano, S. (2003). *Hydraulics of Stepped structures - importance of flow regimes on stepped chutes and practical application in developing countries*. Delft, Netherlands: IHE Delft Institute for Water Education.
- Matos, J., Frizell, K. H., André, S., & Frizell, K. W. (2002). On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows. In: *Hydraulic measurements and experimental methods 2002* (pp. 1-11). Reston, USA: American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/40655(2002)58
- Medhi, B. J., Singh, A., Thokchom, A. K., & Mahapatra, S. (2019). Experimental and computational study on flow over stepped spillway. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(5), 2101-2112. DOI: 10.1007/S12206-019-0116-5/METRICS

- Nikseresht, A. H., Talebbeydokhti, N., & Rezaei, M. J. (2013). Numerical simulation of two-phase flow on step-pool spillways. *Scientia Iranica*, 20(2), 222–230. DOI: 10.1016/j.scient.2012.11.013
- Orszag, S. A., Yakhot, V., Flannery, W. S., & Boysan, F. (1993). Renormalization group modeling and turbulence simulations. On *near-wall turbulent flows*. *Near-wall turbulent flows: Proceedings of the International Conference on Near-Wall Turbulent Flows*, Tempe, Arizona, USA, 15-17 March 1993, Elsevier Publishing Company.
- Saqib, N. U., Akbar, M., Pan, H., Ou, G., Mohsin, M., Ali, A., & Amin, A. (2022). Numerical analysis of pressure profiles and energy dissipation across stepped spillways having curved risers. *Applied Sciences* 2022, 12(1), 448. DOI: 10.3390/APP12010448
- Sarkardeh, H., Marosi, M., & Roshan, R. (2015). Stepped spillway optimization through numerical and physical modeling. *International Journal of Energy and Environment*, 6(6), 597-606. Recuperado de <https://www.ijee.ieefoundation.org/>
- Sotelo-Ávila, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. México, DF, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tabbara, M., Chatila, J., & Awwad, R. (2005). Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers & Structures*, 83(27), 2215-2224. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.005
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Harlow, England: Pearson Education Ltd.

- Wang, F. F., Wu, S. Q., & Zhu, S. L. (2019). Numerical simulation of flow separation over a backward-facing step with high Reynolds number. *Water Science and Engineering*, 12(2), 145-154. DOI: 10.1016/J.WSE.2019.05.003
- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence modeling for CFD* (3rd ed.). La Cañada, California: DCW Industries, Inc.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*, 4(7), 1510-1520. DOI: 10.1063/1.858424
- Zare, H. K., & Doering, J. C. (2012). Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(2), 140-153. DOI: 10.1139/L11-121
- Zhan, J., Zhang, J., & Gong, Y. (2016). Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 6(3), 139-142. DOI: 10.1016/J.TAML.2016.03.003
- Zuhaira, A. A., Al-Hamd, R. K. S., Alzabeebee, S., & Cunningham, L. S. (2021). Numerical investigation of skimming flow characteristics over non-uniform gabion-stepped spillways. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4). DOI: 10.1007/S41062-021-00579-W

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-03

Articles

Estimation of the willingness to pay in two aquifers in Baja California, Mexico

Estimación de la disponibilidad a pagar en dos acuíferos en Baja California, México

Lázaro S. Elizondo¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0374-0594>

Alonso Aguilar-Ibarra², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1030-713X>

Robert H. Manson³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9732-8894>

Leopoldo G. Mendoza-Espinosa⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7795-3665>

¹Independent consultant, Ensenada, Baja California, Mexico,
lazaro.elizondo@gmail.com

²Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional
Autónoma de México, Mexico, aaguilar@iiec.unam.mx

³Instituto de Ecología, A. C., Xalapa, Veracruz, Mexico,
robert.manson@inecol.mx

⁴Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de
Baja California, Ensenada, Baja California, Mexico,
lmendoza@uabc.edu.mx

Corresponding author: Leopoldo G. Mendoza-Espinosa,
lmendoza@uabc.edu.mx

Abstract

This study presents an assessment of the perceptions and willingness-to-pay (WTP) of farmers using groundwater for irrigation in two aquifers in northern Baja California, Mexico. Contingent Valuation (CV) measured their WTP to ensure availability of groundwater in the future. Data from surveys of 70 and 54 farmers in the Maneadero and Guadalupe valleys, respectively, were combined and analyzed using logistic regression. Farmer WTP is influenced by variables reflecting “present water scarcity for agricultural use”, “education and family income levels”, “partial use of wastewater for irrigation”, “water quality”, and “payment amount”. A WTP estimate of \$US 0.13/m³ suggests that the environmental cost of depleting aquifers over a 20-year span could reach \$US 17.4-24.9 million for the Guadalupe aquifer and \$US 20.50 million for the Maneadero aquifer. This information could serve as a starting point to help decision makers in northern Mexico design more environmentally sustainable pricing policies, including investing revenues in long-term aquifer restoration.

Keywords: Aquifer depletion, environmental costs, contingent valuation method, willingness to pay.

Resumen

Este estudio presenta una evaluación sobre las percepciones y la disponibilidad a pagar (DAP) de agricultores empleando agua subterránea para irrigación de productos agrícolas en dos acuíferos del norte de Baja California, México. Se empleó el método de valuación contingente (VC) para medirla y asegurarse de la disponibilidad de agua en el futuro. Se combinaron datos de encuestas de 70 y 54 agricultores de los valles de Maneadero y Guadalupe, respectivamente, analizados usando regresión logística. La DAP de los agricultores es influenciada por las variables "escasez de agua actual para uso agrícola", "nivel de educación", "ingreso familiar", "uso parcial de aguas residuales para irrigación", "calidad del agua" y "cantidad a pagar". Una DAP estimada de \$0.13 dólares/m³, sugiere un costo ambiental de agotamiento de acuíferos de 17.4-24.9 millones de dólares para el acuífero de Guadalupe y \$20.4 millones para el acuífero de Maneadero. Esta información puede servir como punto de partida para ayudar a tomadores de decisiones en el norte de México a diseñar políticas de precios más sostenibles, e invertir en la restauración de acuíferos a largo plazo.

Palabras clave: agotamiento de acuífero, costos ambientales, método de valuación contingente, disponibilidad a pagar.

Received: 02/03/2023

Accepted: 31/10/2023

Published online: 04/12/2023

Introduction

The Dublin Statement of 1992 declared water an economic good and highlighted economic valuation as an important tool for improving efficiency and equity in Integrated Water Resource Management (IWRM) plans, particularly within watersheds (Owen, Mirghani, Diene, Tuinhof, & Taylor, 2010). The economic valuation of water resources has subsequently become an important component of groundwater management, helping to both regulate rates of extraction (Koundouri, 2004) and generate royalties or fees for investment in aquifer restoration (Sukhdev, Wittmer, & Miller, 2014; Mancosu, Snyder, Kyriakaki, & Spano, 2015). However, the value of groundwater used for irrigation is rarely quantified (Bierkens, Reinhard, De Bruijn, Veninga, & Wada, 2019), resulting in undervaluation, overexploitation, and poor public management of such resources (Bergkamp & Cross, 2006; Young & Loomis, 2014).

Another reason for valuing environmental assets is increasing awareness of the loss of services that are being poorly managed (Ninan, 2014). This is especially true for groundwater resources that are frequently treated as limitless and low-cost in the agricultural sector (Famiglietti, 2014; Vadiati, Adamowskia, & Beynaghi, 2018). Since irrigation for agriculture accounts for 70 % of groundwater water withdrawals globally (FAO, 2016), and with groundwater depletion increasing by 22 % just in the period 2000-2010 (Dalin, Wada, Kastner, & Puma, 2017), more economic valuation is urgently needed in this sector.

In semiarid and arid regions, indiscriminate groundwater withdrawals can simultaneously worsen long-term water scarcity and water resource management (Siebert *et al.*, 2010; Wada, Wisser, & Bierkens, 2014). This is the case in Mexico, where farmers pay nothing for groundwater used for crop irrigation (Garrido & Calatrava, 2010; Tellez-Foster, Dinar, & Rapoport, 2018; Conagua, 2016) and, thanks to notable government subsidies, pay only a fraction of the true electricity costs for pumping groundwater (Muñoz-Piña *et al.*, 2006). As a result, groundwater resources in this region are severely undervalued and poorly managed, resulting in elevated rates of groundwater extraction (Badiani & Jessoe, 2013; Suna, Sesmeroa, & Schoengold, 2015). Between 2003 and 2019 increases in overexploitation of groundwater in Mexico resulted in a 7.6 % annual rise in aquifer depletion costs (INEGI, 2020).

This paper aimed to assess the perception of farmers using groundwater for irrigation and their willingness to pay (WTP) for the restoration of aquifers in Ensenada, Baja California, Mexico, a region highly dependent on groundwater for irrigation. We sought to test the hypothesis that valuation of the benefits of providing groundwater for irrigation from the Guadalupe and Maneadero aquifers influences farmer WTP in this region and thus, could help foster improved management of water resources. Apart from the value of water resources as natural capital, users' perceptions of the management of groundwater, electricity subsidies for pumping groundwater for irrigation, and the cost-benefit trade-off of alternative strategies to mitigate water scarcity in the area were also estimated in this study. The socioeconomic and geographic contexts of the study area are presented in the following section, followed by a description of the methodology used for assessing both farmer

perceptions and WTP, the presentation of the results obtained, and finally a discussion of our findings and their potential importance in strengthening management recommendations for farmers and decision-makers in northern Mexico.

Regional context

The city of Ensenada and the agriculture-dominated valleys of Guadalupe and Maneadero are located in northwestern Baja California state, Mexico, along the Pacific Ocean (Figure 1). The Guadalupe watershed is predominantly devoted to vineyards, while the Maneadero watershed produces a variety of agricultural products, some of which are exported to the United States. The region has a Mediterranean climate with average monthly temperatures ranging from 12 - 18°C, dry summers, and winter precipitation not exceeding 300 mm (Conagua, 2020). Surface water flow is practically non-existent except during rare storm events with most precipitation either evaporating or infiltrating immediately into the sub-soil and aquifers. According to interviews with the directors of local groundwater technical committees of each aquifer (known by their Spanish acronym COTAS) in 2018, approximately 80 % of the water used for irrigation comes from pumping groundwater (J. Lafarga and A. Guzman, personal communication). COTAS were designed to help regulate groundwater extractions and to stabilize aquifer levels through the decentralization of water resources management and fostering the participation of farmers in decision making (Foster, Garduño, & Kemper, 2004). However, Wester, Sandoval-Minero and Hoogesteger (2011) argue that they have not achieved sustained reductions in groundwater

extractions due to substantial subsidies for water and electricity subsidies, as well as a lack of both financial resources and enforcement capability.

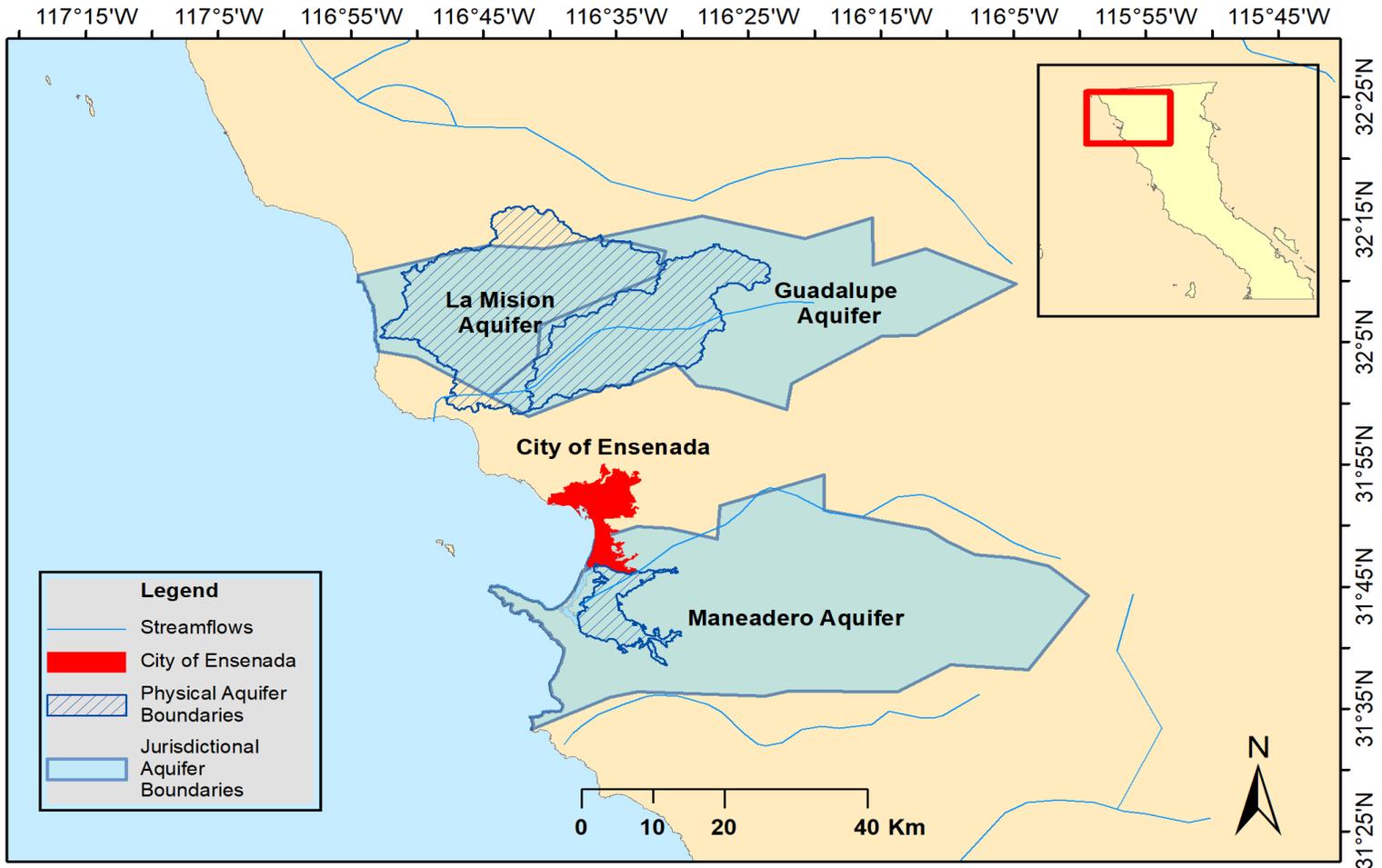


Figure 1. Map of aquifers and water management boundaries in the Guadalupe and Maneadero watersheds in Baja California State, Mexico.

In the Guadalupe valley, there are three small towns, El Porvenir, Las Minas, and Francisco Zarco, with an overall population of 8 611

inhabitants (INEGI, 2020) According to Conagua (2020) annual recharge of the Guadalupe aquifer is approximately 18.8 Mm³, while average annual extraction is 37.2 Mm³ resulting in a deficit of -18.4 Mm³. Approximately 81 % of this water is used for crop irrigation, followed by usage in public water systems (17 %), and for commercial and industrial use (2 %) (REPDA 2018). In 2015 agriculture 2 368 ha were used for agriculture, 81.9 % (1940 ha) for vineyards and 18.1 % (428 ha) for crops like olives, oranges, lime and alfalfa. Grape production from the Guadalupe valley in 2017 was for wine (17 283 tons) and fruit (3 386 tons), with a commercial value exceeding \$19.9 million USD (Sagarpa & Sefoa, 2017).

The Maneadero valley, located 10 km south of the city of Ensenada, has a population of approximately 30 656 inhabitants (OIEDRUS 2015). According to Conagua (2018), annual Maneadero aquifer recharge is 33.8 Mm³, with extraction totaling 38.5 Mm³ and a resulting annual deficit of -4.7 Mm³. The Maneadero aquifer supplies 15.3 % (190 lps or 5.9 Mm³) of the annual water budget for the city of Ensenada for general use (CESPE, 2017). According to OIEDRUS (2015), in 2015 the total agriculture surface was 3756 ha. Investment in the partial (150 lps) reuse of treated wastewater from Ensenada in this valley for irrigation of 400 ha and the production of fodder, flowers, and wood products in three harvest cycles is estimated to generate USD \$14.2 million and provide 4 000 jobs annually (Villareal, 2021).

Methodology

Willingness to pay

In the present study, farmer Willingness to Pay (WTP) to preserve groundwater for irrigation in both Guadalupe and Maneadero valleys was calculated using contingent valuation (CV). CV has been used to measure the value of non-market goods and seeks to elicit individuals' preferences in monetary terms in a variety of contexts (Bateman *et al.*, 2013; Young & Loomis, 2014). Economic value is assessed using a hypothetical scenario whereby a sample of the population is interviewed, and individuals are asked to state their WTP for an increase or decrease in quantity or quality of a given environmental good or service (Hanemann, 2006).

The survey

A CV survey was designed (see supplementary material) following procedures in Carson and Hanemann (2005), and Salman and Al-Karablieh (2004) and consisted of four sections:

1. Background for respondents, providing a detailed description of the water supply of each aquifer, and the costs of water per m³.
2. Assessment of the perceptions of farmers, including their attitudes towards water resources and the environment, and their degree of confidence in water management institutions, using a Likert scale.

3. Presentation of a hypothetical scenario with an associated WTP value scale allowing respondents to select among amounts and forms of payment, and to justify unwillingness to pay if that was the case.
4. Questions describing the socio-economic profile of survey respondents.

To determine the appropriate survey sample size (n) for each watershed, the following formula was used:

$$n = N/1 + Ne^2$$

Where:

N = farmer population.

e = level of precision assuming a 95 % confidence level and 5 % margin of error.

Farmers in each watershed were randomly selected using systematic selection (K): $K = N/n$ (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, & Baptista-Lucio, 2006) and associated lists of farmers from COTAS and the Public Register of Water Rights (REPDA). Questionnaires were applied from May to October 2016. Guadalupe's substantially larger number of farms (and water concessions) made sampling more challenging and resulted in a lower proportion of farms surveyed overall: a total of 153 and 158 questionnaires, representing 47 and 29 % of total agriculture concessions in Maneadero and Guadalupe watersheds, respectively. Prior to the application of the survey, a pilot test was

conducted with 15 farmers in both watersheds to verify that responders understood the questions and had time to respond to them and to receive additional feedback from respondents for improving this instrument. As with the overall survey, individuals for the pilot test were selected randomly from the list of farmers registered in COTAS.

A complete description of the independent variables from the survey considered in the WTP analyses is presented in Table 1.

Table 1. List of independent and dependent (*) variables included in contingent valuation (CV) analyses of changes in willingness to pay (WTP) by farmers using groundwater for irrigation in the Guadalupe and Maneadero watersheds in Baja California, Mexico. Each variable was assigned a unique code and is briefly described together with the type of measurement unit, type of variable, and potential relationship with the payment amount (Sign).

Variable Code	Variable Description	Measurement Units	Variable Type	Sign
RGEN	Respondent's gender	1=female, 0=male	Nominal	–
RAGE	Respondent age	Likert scale	Ordinal	–
HEDU	Highest education level	Likert scale	Ordinal	–
TFIN	Total family income	Mexican Pesos	Ordinal	+
GWVA	Perception of groundwater value as a natural resource, a non-valued human right, or a private right	Likert scale	Ordinal	+
OVEX	Perception that over extraction has caused aquifer depletion	Likert scale	Ordinal	+

Variable Code	Variable Description	Measurement Units	Variable Type	Sign
WREX	Willingness to reduce extraction today to maintain future availability	Likert scale	Ordinal	–
WCST	Farmer water concession status	Likert scale	Nominal	+
WAQU	Perception of the importance of water quality for agricultural irrigation	Likert scale	Ordinal	–
LOST	Land ownership status by the concessionaire	Likert scale	Nominal	–
OIMA	Perception that aquifer is overexploited due to inefficient management	Likert scale	Ordinal	–
OLEV	Perception that aquifer is overexploited due to lack of economic valuation	Likert scale	Ordinal	+
AIWS	Perception that agriculture intensification is causing current water scarcity	Likert scale	Ordinal	–
DWMA	Perception of deficient water management by the Ensenada State Commission of Public Services (CESPE)	Likert scale	Scale	+
GCOA	Perception that groundwater concessions are overallocated	Likert scale	Scale	+
AQOE	Perception of aquifer overexploitation	Likert scale	Scale	+
ITWI	Perception of insufficient use of treated wastewater for irrigation	Likert scale	Scale	+
ISHI	Perception that decision makers ignore stakeholder input	Likert scale	Scale	–

Variable Code	Variable Description	Measurement Units	Variable Type	Sign
PMSG	Farmer preferred maximum for the supply of groundwater for irrigation estimated per cubic meter	Mexican Pesos, Likert scale	Scale	–
WTP*	Willingness to pay to ensure the supply of water for irrigation per cubic meter based on stated costs	Likert scale Yes=1, No=0	Nominal	

Of the 311 questionnaires sent to farmers in both valleys, 124 were completely answered and returned, resulting in a response rate of 39.8 %. Response rates for Maneadero (70 questionnaires returned, 45.7 %) were higher than for the Guadalupe watershed (54 questionnaires returned, 34.1 %). Surveys from both watersheds were combined in our analysis resulting in a single WTP value for farmers in the study region.

The model

For data codification, econometric analysis, estimation of WTP, and the evaluation of variables that could influence WTP, a binary logistic regression model was used in SPSS® v23. Respondents were presented with a set of alternatives and revealed their preferences by the choices that they made in the survey (Greene, 2012). This type of modelling has proven useful for estimating the WTP of farmers for irrigation groundwater in previous studies (Storm, Heckeley, & Heidecke, 2011; Shantha and Asan-Ali, 2014). The valuation function was statistically related to participants' WTP with a set of explanatory variables. A respondent's WTP reflects a threshold (yes or no) of their willingness to pay to obtain a good

or service. The attributes of a good or service and the socioeconomic characteristics of the participants are usually used as covariates in this type of analysis (Kriström, 1990; Riera *et al.*, 2012). Logistic regression models estimated the parameters of the relationship between the dependent and independent variables and predicted the dependent variable from a set of covariates (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013). In these models the dependent variable WTP is binary and coded as "0" if there is no willingness to pay and as "1" if there is willingness to pay under a given scenario. The model equation is exponential and, with logarithmic transformation can be presented as the function (Kleinbaum & Klein, 2010):

$$\ln\left(\frac{\hat{y}}{1-\hat{y}}\right) = \beta_0 + \beta_i x_i + \epsilon \quad (1)$$

Where:

y = Willingness To Pay

x_i = Independent variables

β₀ = Constant term

β_i = Regression coefficient of variable i

ε = Error term

Farmer's mean maximum WTP was calculated by dividing the coefficient of the constant by the coefficient of payment (Kriström 1990; Riera *et al.*, 2012). WTP was also used to estimate the value of groundwater as a natural capital by multiplying WTP by the quantity (m³)

of water lost due to overexploitation or the quantity of water required to restore or recharge aquifers.

The independent variables were grouped into categories of exploratory variables and ranked according to missing observations (lack of response in the survey). Variables that had two or more missing observations were eliminated to improve model quality. Additionally, independent variables were tested for correlations before logistic regression analysis with only one of a pair of correlated variables used in model construction.

Results

Socio-economic characteristics of the surveyed population

A total of 81.5 % of survey respondents were male (57 in Maneadero, 44 in Guadalupe) and only 18.5 % were female (13 Maneadero, 10 Guadalupe). Farmers' average age was 52. Most families were composed of four members. In terms of education, 8 % of respondents had completed postgraduate studies, while 29 % had completed a university degree, 3 % technical studies, 27 % high school, 22 % secondary, and 10 % primary studies with only 1 % having no formal education. The average income of participants in the survey was USD \$966 per month, which is 42 % higher than per capita income nationally in Mexico (USD \$680; INEGI, 2017) using 2017 prices.

Assessment of farmer perceptions

The majority of farmers (61 %) perceived groundwater from aquifers as a natural resource of great value for ensuring future water supply; 21 % recognized this water as a public resource that must be valued, and 16 % regarded it as a human right that has not been valued. Most respondents (87 %) agreed that excessive extraction of groundwater has led to aquifer overexploitation. Likewise, 81 % agreed that this overexploitation has resulted from a lack of economic valuation and indicated (87 %) they were willing to reduce water extraction rate now to ensure greater availability in the future. Regarding water irrigation methods, 87 % of farmers use drip irrigation, 6 % sprinklers, and 3 % open channels to transport water in the study watersheds.

Slightly less than half of farmers (48 %) were unsure about transparency in water management by the institutions in charge (municipal, state, and federal), while 13 % concluded that there is no transparency and 39 % characterized water management as transparent. The majority of farmers (74 %) believe that aquifers have been overexploited due to poor management by the responsible local, state and federal institutions like CESPE, the Baja California Water Commission (CEA) and Conagua, versus 8 % that thought this was not the case and 18 % that did not express an opinion. Additionally, the lack of enforcement of environmental laws was recognized by 77 % of farmers as another cause of water mismanagement in the area. Regarding perceptions of representation in dialogues with municipal, state, and federal agencies on water issues, only 38 % of respondents felt adequately represented, while 45 % were not sure, and 16 % did not feel

represented at all. Most respondents (92 %) felt that politicians do not take into account proposals by scientists, farmers, and NGOs to improve aquifer management, which include the use of reclaimed water for crop irrigation and aquifer recharge.

Only 28 % of those surveyed have confidence in the way the federal agency Conagua is managing groundwater, while 36 % are uncertain, and 35 % have no confidence in Conagua's management. In contrast, 58 % concur that COTAS have contributed to improved groundwater management, with 30 % of respondents being undecided. Interestingly, those with agricultural concessions perceive (66.9 %) that COTAS do not have the authority, nor the human and financial resources, to manage groundwater adequately. A clear majority of farmers (76 %) identify planting crops with less water demand and greater profitability as a potential measure for improving groundwater management. A majority also consider current water scarcity for irrigation a serious matter (62 %), with 77 % indicating that the situation will be very serious in 10 years.

When asked about possible immediate solutions to reduce aquifers' overexploitation, 79 % of farmers viewed the application of treated wastewater as a viable option for irrigation if tertiary treatment is added. Likewise, 76 % considered the idea of injecting treated wastewater into aquifers to replenish them a promising alternative and 81 % perceived reducing electricity subsidies for pumping out groundwater for irrigation as a non-urgent solution.

Variables influencing WTP

The results of the stepwise logistic regression model with the variables that best explain WTP of farmers for conserving groundwater are summarized in Table 2. Results of the goodness-of-fit tests of the logistic regression model (Omnibus $\chi^2_6 = 20.850$, $p = 0.002$) with six independent variables indicated a rejection of the null hypothesis and that the several independent variables had a significant influence on the response variable WTP. Overall, the model successfully predicted farmer WTP with 97.6 % accuracy. Therefore, the hypothesis that the valuation of the benefits of groundwater for irrigation from the aquifers' Guadalupe and Maneadero helps explain farmer's WTP is supported. The independent variables included in the model explained about 21.8 and 69 % of the variation in dependent variable WTP according to Cox and Snell and Nagelkerke R^2 values, respectively. Results from the Wald tests for each of the independent variables in the model indicate that the variables that best explain WTP are AIWS and HEDU, followed by TFIN, ITWI, WAQU and PMSG. As the perception that agriculture intensification is causing water scarcity (AIWS), the importance of water quality for irrigation (WAQU), the highest education level (HEDU), and the preferred maximum for the supply of groundwater for irrigation (PMSG) increased, WTP to restore aquifers with treated sewage water decreased. In contrast, as total family income (TFIN) and the perception of underutilization of wastewater for irrigation (ITWI) increased, WTP also increased.

Table 2. Summary of the variables identified as significant in a logistic regression model in explaining farmer WTP for groundwater conservation in Baja California, Mexico.

Variable	B	Standard Error	Wald χ^2	Sig	Exp(B)	95 % C.I. for EXP(B)	
						Lower	Upper
Constant	-39.536	3827.863	0.000	0.992	0.000		
HEDU	0.909	0.534	2.896	0.089	2.483	0.871	7.078
TFIN	3.257	2.093	2.421	0.120	25.973	0.429	1571.282
PMSG	16.671	3827.842	0.000	0.997	17382330.33	0.000	-
ITWI	1.645	1.171	1.972	0.160	5.179	0.522	51.424
AIWS	5.241	2.733	3.676	0.055	188.775	0.890	40048.1011
WAQU	1.187	1.028	1.334	0.248	3.278	0.437	24.582

Environmental cost of aquifer depletion

The estimated farmer WTP was \$US 0.13, which can be interpreted as the average amount that sampled farmers with agricultural concessions would be willing to pay per m³ of water extracted/utilized to ensure the continued benefits of provisioning groundwater for irrigation from the aquifers in the study watersheds. To obtain a value of the environmental cost of the depletion of the study aquifers, estimated WTP was multiplied by the quantity of m³ lost over a 20-year span. Historic (1996) values of water availability for the Guadalupe aquifer from Conagua (1998) and Andrade-Borbolla (1997) were used for these calculations and estimated as 218 Mm³ and 160 Mm³, respectively. Conagua (2020) reported a water availability of 26.4 Mm³ in 2016 for the same aquifer, suggesting a loss

over 20 years of between 133.6 to 191.6 Mm³ or 84-88 % of water reserves. In monetary terms, this is equivalent to \$US 17.4-24.9 million since 1997 (at current prices). This figure represents the environmental cost of aquifer depletion for the period 1997-2016 or approximately \$US 1 million per year. Likewise, the Maneadero aquifer had an availability of 419.8 Mm³ in 1997 that declined to 262.1 Mm³ in 2016 (Conagua, 2003; Conagua, 2018), representing a depletion of about 157.7 Mm³ (38 %) in 20 years. The estimated environmental cost of the overexploitation of this aquifer is \$US 20.50 million during the period 1997-2016 (current prices), which is similar to the annual figure for the Guadalupe aquifer of an approximate cost of \$US 1 million per year.

Discussion

The estimate of the value of a cubic meter of water in this study (\$US 0.13/ m³) is similar to that of other studies. Medellín-Azuara, Mendoza-Espinosa, Lund, Harou and Howitt (2009) used the CALVIN Hydro-economic model to estimate shadow values for irrigation water for Guadalupe and Maneadero aquifers of \$US 0.07 /m³ and \$US 0.12 /m³, respectively at 2017 prices. Vélez-Rodríguez, Padilla-Bernal and Mojarro-Dávila (2015) estimated the value of water between \$US 0.11 /m³ and \$US 0.12 /m³ for agricultural use by producers in two aquifers of Zacatecas State, Mexico. In other arid or semi-arid regions of the world, the value of a cubic meter of aquifer water also approximates these figures. Bozorg-Haddad, Marzieh-Malimir, Mohammad-Azari and Loáiciga (2016), applying a probabilistic optimization method in the coastal region of Khazar in Iran, found that farmers' WTP was \$US 0.17 /m³ at 2017

prices. Storm *et al.* (2011), using contingent valuation and a logistic regression model in the Moroccan Drâa Valley estimated average WTP by farmers for groundwater for agricultural use was between \$US 0.09 and 0.18 /m³ at 2017 prices. Wei *et al.* (2007) in northern China, estimated that farmers' WTP is \$US 0.19 /m³. Overall, the WTP value for irrigation water in these arid or semi-arid regions appears to be remarkably similar, despite possible variation in water scarcity, culture, and socioeconomic conditions.

Contingent valuation has been widely used for more than 25 years as a versatile and powerful methodology for estimating the monetary value of non-market goods (Carson, 2012; Tang, Nan, & Liu, 2013). However, WTP should not be understood in the same terms in which transactions are made in the market. This is a form of psychological equivalence that implies the improvement of a resource for individual well-being. Rather, WTP is a measure of satisfaction that describes a willingness to sacrifice income in the short-term to ensure the long-term conservation of ecosystems and the services they provide (Kareiva, Tallis, Ricketts, Daily, & Polasky, 2011). WTP is a measurable value that represents the particular choices, interests, incomes, education, and perceptions of stakeholders, and provides information about the value that people assign to different alternatives and thus can be a valuable guide to solve the conflict of the use of resources by allowing stakeholders to measure the impact of their choices on a monetary scale (Kriström, 1990).

One possible methodological limitation of our study was the lack of separate estimates for each aquifer. We were forced to pool our data into

a single analysis due to a reduced sample size, however, dummy variables used in the logistic regression analysis (*i.e.*, 1 = Guadalupe; 0 = Maneadero; Hosmer *et al.*, 2013) revealed this was not a problem since no statistically significant differences were detected between watersheds. This result should not be surprising since both valleys exhibit similar degrees of water scarcity, a dependency on groundwater as the only source of water for irrigation, subsidies for the cost of groundwater and electricity for extracting groundwater for irrigation, use of technology (drip irrigation predominates), and decision-making structures with each valley having its own COTAS regulated by Mexico's National Water Law under Conagua.

The estimated economic value of aquifer depletion of approximately \$US 1 million yr⁻¹ for both aquifers in this study should help inform public policy in Baja California, Mexico. On the one hand, this figure can be interpreted as the opportunity cost for using groundwater in the future assuming current rates of extraction and levels of scarcity remain constant (Job, 2010). In other words, this is the amount of water that future generations will not have access to without additional efforts to reduce consumption or by restoring supply. On the other hand, saving water for future uses would also imply an opportunity cost. In fact, in the short term, lower levels of agricultural production would be potentially observed in comparison to current levels of production. In the mid-and long-term, however, a constant supply of water for future irrigation would be assured, bringing in benefits for future generations. Under the sustainable development principles, the latter scenario should be preferred. It is noteworthy to mention that under both scenarios, subsidies directed to lower water extraction costs (either in the form of

lower electricity, water tariffs, or both) to producers remain an unsustainable practice that hampers conservation efforts. Indeed, sustainability implies a trade-off between present and future generations in the use of resources that becomes very apparent through these types of calculations. Not surprisingly, 81 % of the farmers perceived reducing electricity subsidies for pumping out groundwater for irrigation as a non-urgent solution. The subsidy of 91.6 % in electricity that the farmers received in 2015 represented a total of 1 337 million pesos (equivalent to USD \$70.4 million) (Sagarpa, 2016) so there is little incentive to change this.

The current levels of aquifer depletion in the Guadalupe and Maneadero aquifers highlight the fact that groundwater use is currently unsustainable. One way to overcome this challenge would be to require the federal government to reconsider its subsidies for water pumping. Not surprisingly, most of the regions in Mexico where aquifers are overexploited correspond to those with higher electricity subsidies for agricultural irrigation (Robles-Berlanga, 2017). These subsidies create perverse incentives to over-exploit groundwater resources (Badiani & Jessoe, 2013; Tellez-Foster *et al.*, 2018; Suna *et al.*, 2015). According to the Centro Mario Molina (2014), government spending for this type of subsidy to the agricultural sector increased 157 % between 2003 and 2013. Furthermore, Robles-Berlanga (2017) points out that such a subsidy is particularly regressive because it benefits the richest farmers the most. The OECD (2015) has already recommended that Mexico eliminate electricity subsidies for irrigation pumping that have detrimental impacts on water demand as well as groundwater management. However, current political and social realities in the country make this a very difficult

decision. Tellez-Foster *et al.* (2018) and Muñoz-Piña *et al.* (2006), propose decoupling as an alternative policy intervention to circumvent these issues. Decoupling is the process whereby the economic value of the current subsidy is converted into a direct economic transfer or additional income for farmers who are then charged the real electricity prices that will increase over time as the water table drops and more energy is required for pumping (Muñoz-Piña *et al.*, 2006).

Alternatively, our estimates of aquifer depletion costs may serve as a benchmark for investing in Aquifer Storage and Recovery (ASR) technologies (Barber 2007). In both the Guadalupe and Maneadero watersheds, alternatives include using treated wastewater for irrigation and treated wastewater for recharge of depleted aquifers (Elizondo & Mendoza-Espinosa 2020). Indeed, Abdalla and Al-Rawahi (2013) suggest that measures to reduce extraction can be more effective when combined with the restoration of aquifer levels by using this type of technological innovation.

Conclusions

Contingent Valuation was used to measure farmer WTP to ensure the continued use of groundwater for irrigation in two arid valleys in northern Mexico. Results indicate that WTP is significantly influenced by variables such as present water scarcity for agricultural use, education level, family income, the partial use of treated wastewater for irrigation, water quality for irrigation, and WTP amount. The WTP estimate of \$US 0.13 /m³ obtained in this study is consistent with many other studies conducted in

arid or semi-arid regions and suggests that the environmental cost of depleting aquifers over a 20-years span could range between \$US 17.4-24.9 million for the Guadalupe aquifer and \$US 20.50 million for the Maneadero aquifer. This information, including the high economic costs of doing nothing, and the willingness of local farmers to help pay for possible solutions, could serve as a starting point for decision-makers faced with the challenge of designing an environmental pricing policy that values groundwater for irrigation according to farmers WTP and invests potential revenues in strategies that ensure the long-term restoration and conservation of aquifers. Both decoupling of electricity subsidies for pumping groundwater and complementary use of treated wastewater for irrigation and aquifer recharge after adding tertiary treatment and quality control should be considered as viable tools in the development of future strategies in this region.

Acknowledgements

LE is grateful to the Mexican Council of Science and Technology (Conacyt) for a scholarship for his PhD studies. We also thank Engineers Alejandro Guzman and Jezrael Lafarga, technical managers of COTAS Maneadero and Guadalupe, respectively, for their technical input. Finally, special thanks to the farmers that kindly let us enter their properties and answered the questions regarding our research project.

References

- Abdalla, O. A. E., & Al-Rawahi, A. S. (2013). Groundwater recharge dams in arid areas as tools for aquifer replenishment and mitigating seawater intrusion: Example of AlKhod, Oman. *Journal of Hydrology*, 512, 16-26.
- Andrade-Borbolla, M. (1997). *Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, municipio de Ensenada, Baja California. (Geohydrological update of the Guadalupe Valley, Ensenada municipality, Baja California)*. Ensenada, Mexico: Grupo Agroindustrial del Valle de Guadalupe México.
- Badiani, R., & Jessoe, K. (2013). *The impact of electricity subsidies on groundwater extraction and agricultural production*. Recovered from <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Impact-of-Electricity-Subsidies-on-Groundwater-Badiani-Jessoe/5c2d394b8fb8e2d0466a0bbd99e837e00893a2aa>
- Barber, C. (2007). Augmentation of groundwater resources through aquifer storage and recovery (ASR) method. In: Thangarajan, M. (ed.). *Groundwater: Resource evaluation, augmentation, contamination, restoration, modeling and management* (pp. 112-127). New York, USA: Springer.

- Bateman, I. J., Harwood, A. R., Mace, G. M., Watson, R. T., Abson, D. J., Andrews, B., Binner, A., Crowe, A., Day, B. H., Dugdale, S., Fezzi, C., Foden, J., Hadley, D., Haines-Young, R., Hulme, M., Kontoleon, A., Lovett, A. A., Munday, P., Pascual, U., Paterson, J., Perino, G., Sen, A., Siriwardena, G., van Soest, D., & Termansen, M. (2013). Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom. *Science*, 341(6141), 45-50. DOI: 10.1126/science.1234379
- Bergkamp, G., & Cross, K. (2006). *Groundwater and ecosystem services: Towards their sustainable use*. International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS). Recovered from <https://www.semanticscholar.org/paper/Groundwater-and-Ecosystem-Services-%3A-towards-their-Bergkamp-Cross/43ae3238f49bd6bb784defead555872abe62f4ad>
- Bierkens, M. F. P., Reinhard, S., De Bruijn, J. A., Veninga, W., & Wada, Y. (2019). The shadow price of irrigation water in major groundwater-depleting countries. *Water Resources Research*, 55, 4266-4287. DOI: 10.1029/2018WR023086
- Bozorg-Haddad, O., Marzieh-Malimir, M., Mohammad-Azari, S., & Loáiciga, H. A. (2016). Estimation of farmers' willingness to pay for water in the agricultural sector. *Agricultural Water Management*, 177, 284-290. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.08.011
- Carson, R. T., & Hanemann, W. M. (2005). Chapter 17. Contingent valuation. In: Mier, K. G., Vincent, J. R., (eds.). *Handbook of environmental economics. Volume 2* (pp. 821-936). The Netherlands: Elsevier.

- Carson, R. T. (2012). *Contingent valuation: A comprehensive bibliography and history*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.
- Centro Mario Molina. (2014). *Reforma y desacoplamiento de subsidios eléctricos que causan la sobreexplotación de acuíferos. Propuestas ambientales de reforma fiscal*. Recovered from <https://agua.org.mx/biblioteca/reforma-y-desacoplamiento-de-subsidios-electricos-que-causan-la-sobreexplotacion-de-acuiferos/>
- CESPE, Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada. (2017). *Cobertura de agua potable en el municipio de Ensenada*. Recovered from www.cespe.gob.mx
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (1998). *Actualización piezométrica del Valle de Guadalupe Acuífero, BC*. Documento interno del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Valle de Guadalupe. Mexico City, Mexico: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2003). *Plan de manejo integrado del agua para el acuífero de Maneadero, B.C. Trabajo de consultoría realizado por la empresa Desarrollo y Sistemas, S. A., según el contrato No. GAS-010-PRO02 de diciembre de 2002*. Mexico City, Mexico: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2016). *Ley Federal de Derechos de Agua, Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016. Artículo 162-D*. Mexico City, Mexico: Comisión Nacional del Agua.

Conagua, Comisión Nacional del Agua (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de Maneadero (0212) estado de Baja California*. Recovered from https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCalifornia/DR_0212.pdf

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guadalupe (0207), estado de Baja California*. Recovered from https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCalifornia/DR_0207.pdf

Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M. J. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543, 700-704. DOI: 10.1038/nature21403

Elizondo, S., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2020). An analysis of water scarcity in a drought prone city: The case of Ensenada, Baja California, Mexico. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 1-55. DOI: 10.24850/j-tyca-2020-02-01

Famiglietti, J. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4, 945-948. DOI: 10.1038/nclimate2425

FAO, Food and Agriculture Organization. (2016). *Shared global vision for groundwater governance 2030 and call for action. Revised edition March 2016*. Recovered from <http://www.fao.org/3/a-i5508e.pdf>

Foster, S., Garduño, H., & Kemper, K. (2004). *The 'COTAS': Progress with stakeholder participation in groundwater management in Guanajuato, Mexico. Sustainable Groundwater Management. Lessons from Practice, GW Mate Case Profile Collection Number 10.* Washington, D.C., USA: The World Bank. Recovered from <https://www.igrac.org/sites/default/files/resources/files/GWMATE%20case%20profile%20-%20Mexico.pdf>

Garrido, A., & Calatrava, J. (2010). Agricultural water pricing: EU and Mexico. In: *Sustainable management of water resources in agriculture* (pp. 1-47). OECD Publishing, Paris. DOI: 10.1787/9789264083578-12-en

Greene, W. H. (2012). *Econometric analysis*. USA: Pearson Education.

Hanemann, W. M. (2006). The economic conception of water. In: Rogers, P. P., Llamas, M. R., & Martinez-Corona, R. (eds.). *Water crisis: Myth or reality Marcelino Botin Water Forum 2004* (pp. 61-92). Taylor and Francis-Balkema. Recovered from <https://www.routledge.com/Water-Crisis-Myth-or-Reality/Rogers-Llamas-Cortina/p/book/9780415364386>

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación* (4ª ed.). Mexico City, Mexico: McGraw-Hill.

Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied Logistic Regression* (3rd ed.). Hoboken New Jersey, USA: John Wiley & Sons.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Encuesta nacional de la ocupación y el empleo, y Sistema de Cuentas Nacionales de México*. Recovered from <https://www.inegi.org.mx/temas/igae/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Cuentas económicas y ecológicas de México 2020 (boletín de prensa núm. 623/20)*. Recovered from <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2020/StmaCntaNal/CtasEcmcasEcolgicas2019.pdf>
- Job, C. A. (2010). *Groundwater economics*. Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor Francis Group. DOI: 10.1017/S0376892911000051
- Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T. H., Daily, G. C., & Polasky, S. (2011). *Natural capital: Theory and Practice of mapping ecosystem services*. United Kingdom, Oxford University Press. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199588992.001.0001
- Kleinbaum, D. G., & Klein, M. (2010). *Logistic regression: A self-learning text*. New York, USA: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4419-1742-3
- Koundouri, P. (2004). Potential for groundwater management: Gisser-Sanchez effect reconsidered, *Water Resources Research*, 40, W06S16. DOI: 10.1029/2003WR002164
- Krström, B. (1990). *Valuing environmental benefits using the contingent valuation method - An econometric analysis* (Umea Economic Studies No. 219). Umea, Sweden: University of Umea.

- Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakaki, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. *Water*, 7, 975-992. DOI: 10.3390/w7030975
- Medellin-Azuara, J., Mendoza-Espinosa, L. G., Lund, J. R., Harou, J. J., & Howitt, R. E. (2009). Virtues of simple hydro-economic optimization: Baja California, Mexico. *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3470-3478. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.05.032
- Muñoz-Piña, C., Avila, S., Jaramillo, L. A., Sainz, J., Martínez, A., Guevara, A., & Stabridis, O. (2006). *Agriculture demand for groundwater in Mexico: Impact of water right enforcement and electricity user-fee on groundwater level and quality (Working paper INE-DGIPEA/0306)*. Mexico City, Mexico: Instituto Nacional de Ecología. Recovered from http://www2.inecc.gob.mx/dgipea/descargas/decoupling_the_subsidy_for_water_pumping.pdf
- Ninan, K. N. (2014). *Valuing ecosystem services: Methodological issues and case studies*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Pub. Recovered from <https://www.e-elgar.com/shop/usd/valuing-ecosystem-services-9781781955154.html>
- OECD, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2015). *Policies to manage agricultural groundwater use Mexico*. Recovered from <https://www.oecd.org/agriculture/topics/water-and-agriculture/documents/groundwater-country-note-MEX-2015%20final.pdf>

- OIEDRUS, Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable de Baja California. (2015). *Panorama general de Valle de Guadalupe, Baja California, 2015*. Recovered from http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/pdf/biblioteca/panoramas/2015/FICHA%20VALLE%20DE%20GUADALUPE%202015.pdf
- Owen, R., Mirghani, M., Diene, M., Tuinhof, A., & Taylor, P. (2010). *Groundwater management in IWRM training manual*. Pretoria, South Africa: Cap-Net. Recovered from <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/groundwater-management-in-iwrm.-training-manual-cap-netagw-netgw-mate-2010.pdf>
- REPDA, Registro Público de Derechos de Agua. (2018). *Base de datos acuíferos de Guadalupe y Maneadero*. Recovered from <https://www.gob.mx/conagua/documentos/registro-publico-de-derechos-de-agua-repda-2019>
- Riera, P., Signorello, G., Thiene, M., Mahieu, P. A., Navrud, S., Kaval, P., Rulleau, B., Mavsar, R., Madureira, L., Meyerhoff, J., Elsasser, P., Notaro, S., De Salvo, M., Giergiczny, M., & Dragoi, S. (2012). Non-market valuation good practice guidelines proposal for forest goods and services. *Journal of Forest Economics*, 18(4), 259-270. DOI: 10.1016/j.jfe.2012.07.001
- Robles-Berlanga, H. M. (2017). *Los efectos del presupuesto en el sector rural*. Mexico City, Mexico: Fundar, Centro de Análisis e Investigación. Recovered from <https://fundar.org.mx/publicaciones/12364/>

Sagarpa, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2016). *Cierre del programa de apoyo a la energía eléctrica para riego agrícola. Avance al 31 de diciembre de 2015*. Mexico City, Mexico: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Sagarpa & Sefoa, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural & Secretaría de Fomento Agropecuario. (2017). *Números de la Actividad Agropecuaria de Baja California*. Recovered from http://www.oeidrus-bc.gob.mx/oeidrus_bca/pdf/baners/NumerosBC%20Ed2017_.pdf

Salman, A. Z., & Al-Karablieh, E. (2004). Measuring the willingness of farmers to pay for groundwater in the highland areas of Jordan. *Agricultural Water Management*, 68(1), 61-76. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.02.009

Shantha, A. A., & Asan-Ali, B. G. H. (2014). Economic value of irrigation water: A case of major irrigation scheme in Sri Lanka. *The Journal of Agricultural Sciences*, 9(1), 44-57. DOI: 10.4038/jas.v9i1.6353

Suna, S., Sesmeroa, J. P., & Schoengold, K. (2015). The role of common pool problems in irrigation inefficiency: A case study in groundwater pumping in Mexico. *Agricultural Economics*, 47, 117-127. DOI: 10.1111/agec.12214

Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Doll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation – A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1863-1880. DOI: 10.5194/hess-14-1863-2010

- Storm, H., Heckelei, T., & Heidecke, C. (2011). Estimating irrigation water demand in the Moroccan Drâa Valley using contingent valuation. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2803-2809. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.06.027
- Sukhdev, P., Wittmer, H., & Miller, D. (2014). The economics of ecosystems and biodiversity (TEEB): Challenges and responses. In: Helm, D., & Hepburn, C. (eds.). *Nature in the balance: The economics of biodiversity* (pp. 3-14). Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- Tang, Z., Nan, Z., & Liu, J. (2013). The willingness to pay for irrigation water: A case study in Northwest China. *Global NEST Journal*, 45(1), 76- 84. DOI: 10.30955/gnj.000903
- Tellez-Foster, E., Dinar, A., & Rapoport, A. (2018). Comparing alternative policies for modification of energy subsidies: The case of groundwater pumping for irrigation. *Journal of Hydrology*, 565, 614-622. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.071
- Vadiati, M., Adamowskia, J., & Beynaghi, A. (2018). A brief overview of trends in groundwater research: Progress towards sustainability? *Journal of Environmental Management*, 223, 849-851. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.06.086
- Vélez-Rodríguez, A., Padilla-Bernal, L. E., & Mojarro-Dávila, F. (2015). Disponibilidad para ahorrar agua de uso agrícola en México: caso de los acuíferos de Calera y Chupaderos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2), 277-290. DOI: 10.29312/remexca.v6i2.688

- Villareal, J. (2021). Piden ejidatarios intervención para mejorar reuso de aguas tratadas. *El Mexicano*, 6/17/21. Recovered from <https://www.el-mexicano.com.mx/Noticia/Estatal/10551/Piden-ejidatarios-intervención-de-diputado-para-mejorar-reuso-de-aguas-tratadas>
- Wada, Y., Wisser, D., & Bierkens, M. F. P. (2014). Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources. *Earth System Dynamics*, 5, 15-40. DOI: 10.5194/esd-5-15-2014
- Wei, Y., Davidson, B., Chen, D., White, R., Li, B., & Zhang, J. (2007). Can contingent valuation be used to measure the in situ value of groundwater on the North China Plain? *Water Resources Management*, 21, 1735-1749. DOI: 10.1007/s11269-006-9123-2
- Wester, P., Sandoval-Minero, R., & Hoogesteger, J. (2011). Assessment of the development of aquifer management councils (COTAS) for sustainable groundwater management in Guanajuato, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19, 889-899. DOI: 10.1007/s10040-011-0733-2
- Young, R., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water*. DOI: 10.4324/9780203784112

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-04

Artículos

Aplicación del algoritmo multiobjetivo NSGA-II en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

Caso: ciudad de Huancavelica, Perú

Application of the NSGA-II multi-objective algorithm in the optimal design of drinking water distribution networks. Case: Huancavelica City, Peru

Tony Tunque-Dueñas¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7893-299X>

Franzua Ricra-Dueñas², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4181-7354>

Iván Ayala³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6906-4120>

Eliana Contreras-Lopez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0685-2004>

Marcelo Portuguez-Maurtua⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2396-0074>

¹Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú, 2011151135@unh.edu.pe

²Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú, 2012151082@unh.edu.pe

³Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú, ivan.ayala@unh.edu.pe



⁴Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú,
econtrerasl@unmsm.edu.pe

⁵Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú,
mportuguez@lamolina.edu.pe

Autor para correspondencia: Tony Tunque-Dueñas,
2011151135@unh.edu.pe

Resumen

En los últimos tiempos se han desarrollado diversos algoritmos genéticos multiobjetivo y su aplicación en optimización de redes de distribución de agua potable, de los cuales NSGA-II ha mostrado un desempeño más sólido. Esta investigación muestra la aplicación de NSGA-II en el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable considerando costo (I_C) y confiabilidad hidráulica (I_R) como funciones objetivo. La investigación se realizó en respuesta a un problema real relacionado con el suministro de agua en la ciudad de Huancavelica. Mediante la información obtenida a través de la EPS EMAPA Huancavelica S.A., y el lenguaje de programación Python, con el Toolkit de Epanet se valida NSGA-II, aplicándolo al diseño de la red de Hanoi. Una vez validado, se analiza la red de Huancavelica, que cuenta con un I_C de 0.31, equivalente a USD 140 099.89 y un I_R de 0.25, y se obtiene un diseño óptimo de red que precisa un I_C de 0.24 con un valor de USD 117 590.12 y un I_R de 0.23, lo cual permite apreciar una diferencia en el I_C de USD 22 509.77 y una reducción del I_R , que la hace una red mucho más confiable que satisface

simultáneamente las restricciones de presión mínima en todos los nudos, además de garantizar condiciones de falla durante su operación. Se determinó que NSGA-II es favorable para el diseño óptimo de redes de agua potable al considerar dos funciones objetivo de costo y confiabilidad hidráulica.

Palabras clave: NSGA-II, red de distribución de agua, costo, confiabilidad hidráulica

Abstract

In recent times, several multi-objective genetic algorithms and their application in optimization of drinking water distribution networks have been developed, of which NSGA-II has shown the strongest performance. This research shows the application of NSGA-II in the optimal design of drinking water distribution networks considering cost (I_C) and hydraulic reliability (I_R) as objective functions. The research was carried out in response to a real problem related to water supply in the city of Huancavelica. Using the information obtained from EPS EMAPA Huancavelica S.A., and the Python programming language with the Epanet Toolkit, NSGA-II is validated by applying it to the design of the Hanoi network. Once validated, the Huancavelica network is analyzed, which has a I_C of 0.31 equivalent to USD 140 099.89 and an I_R of 0.25, and an optimal network design is obtained, which has a I_C of 0.24 with a value of USD 117 590.12 and an I_R of 0.23, which allows appreciating a difference in the I_C of USD 22 509.77 and a reduction of the I_R , which makes it a much more reliable network that simultaneously satisfies the minimum pressure restrictions in all the nodes, in addition to

guaranteeing a capacity to withstand failure conditions during its operation. It is determined that NSGA-II is favorable for the optimal design of drinking water networks considering two objective functions of cost and hydraulic reliability.

Keywords: NSGA-II, water distribution network, cost, hydraulic reliability

Recibido: 27/03/2023

Aceptado: 31/10/2023

Publicado *online*: 04/12/2023

Introducción

Las redes de distribución de agua potable son mecanismos que alimentan o distribuyen agua desde las fuentes hacia la población; están constituidas por componentes hidráulicos conectados para suministrar a los consumidores agua adecuada y de calidad (Parvaze *et al.*, 2023). Una red de abastecimiento de agua urbana debe ser capaz de satisfacer las demandas de agua de los consumidores. Por ello, el fin común que tienen las empresas prestadoras del servicio de agua potable en el mundo es proporcionar un nivel adecuado de servicio y operación eficiente que cumpla con las regulaciones (Wright, Parpas, & Stoianov, 2015). Sin embargo, en los países en vías de desarrollo, las malas estrategias de las empresas de servicios públicos de agua para elegir adecuadamente los diámetros de tuberías dentro de los límites presupuestarios guían a un

diseño inadecuado de redes de distribución de agua potable, lo que se traduce en redes deficientes con condiciones de presión insuficientes para suministrar agua de manera continua a todos los usuarios (Saldarriaga *et al.*, 2022). En consecuencia, se incrementan los reclamos de los usuarios por el servicio ineficiente. Por ejemplo, en la atención de reclamos de la empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA Huancavelica S. A., que opera y regula el funcionamiento de la red de la ciudad de Huancavelica (Perú), los reclamos operacionales ascienden a un 60 % siendo las de mayor incidencia: falta de agua, fugas en tuberías y bajas presiones (EMAPA-HVCA, S. A., 2018).

Aproximadamente el 80 % de la inversión de un proyecto de abastecimiento de agua consiste en su sistema de distribución (Sangroula, Han, Koo, Gnawali, & Yum, 2022). En los últimos años, se ha investigado ampliamente el diseño óptimo de redes de distribución de agua potable por la necesidad de diseños eficientes y sostenibles con escasos recursos (Saldarriaga *et al.*, 2020). En la actualidad, el problema de diseño de una red implica distintos objetivos, como reducir el costo, incrementar la confiabilidad, minimizar riesgos e incrementar la calidad. Por lo tanto, el diseño es de naturaleza multiobjetivo (Ostfeld, 2015). Ante esta necesidad, las investigaciones se han enfocado en la aplicación de algoritmos evolutivos elitistas, como el algoritmo genético de clasificación no dominada (NSGA-II) (Yazdandoost & Izadi, 2016). Aunque se han aplicado diversos algoritmos multiobjetivo a la resolución de problemas de diseño óptimo de redes de distribución de agua potable, con la capacidad de obtener una compensación casi óptima entre costo y confiabilidad, NSGA-II es probablemente el algoritmo multiobjetivo más

famoso y estándar, que ha sido aplicado con éxito en distintos campos (Wang, Guidolin, Savic, & Kapelan, 2015).

Al respecto, Wang *et al.* (2015) investigaron dos objetivos aplicados a 12 redes y realizaron una evaluación comparativa de cinco algoritmos multiobjetivo. NSGA-II con un mínimo ajuste de sus parámetros fue la mejor opción para la optimización de dos objetivos en diseño de redes porque demostró los mejores logros en todos los problemas. Zheng, Zecchin, Maier y Simpson (2016) compararon tres algoritmos multiobjetivo NSGA-II, SAMODE y Borg en seis muestras con dos objetivos, centrándose en la eficacia de búsqueda y el tiempo de ejecución. Si bien los tres algoritmos fueron exitosos en la generación de soluciones no dominadas al inicio e intermedio de la búsqueda con mejoras graduales, NSGA-II ilustró un rendimiento más sólido para encontrar los frentes de dominancia debido a su operador genético de cruce binario. Por otro lado, Zarei, Azari y Heidari (2022) definieron el problema de optimización en varias redes de muestra con los objetivos de minimización de costos y del déficit de presión en toda la red. Para el proceso de optimización codificaron los algoritmos NSGA-II y MOPSO. Los resultados mostraron que estos algoritmos tuvieron una alta capacidad para encontrar soluciones óptimas y capacidad de optimizar la red en términos de costo y presión al encontrar el diámetro de tubería adecuado. Cabe mencionar que NSGA-II utilizó menos tiempo de ejecución y menos repeticiones que MOPSO. La optimización multiobjetivo del diseño de las redes de distribución de agua es el paso previo hacia la gestión adecuada de estas infraestructuras. Por ello, la red de distribución de agua existente en la ciudad de Huancavelica puede ser un caso adecuado para el estudio

de la optimización multiobjetivo del diseño de las redes de distribución de agua mediante NSGA-II.

Por consiguiente, el objetivo de la presente investigación fue la aplicación de NSGA-II en el diseño de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica, en función de los objetivos de costo y confiabilidad hidráulica. Además de implementar un operador de distancia de hacinamiento modificado para mejorar el espacio de soluciones con una mejor distribución. Para ello, se implementó el algoritmo NSGA-II en el lenguaje de programación Python y se incorporó el Toolkit de EPANET (EPANETTOOLS 1.0.0) como motor de cálculo hidráulico de la red. Las alternativas generadas por NSGA-II fueron evaluadas por EPANET y las funciones objetivo se analizaron en el lenguaje Python.

Materiales y métodos

Área de estudio

El caso de estudio está delimitado dentro del sistema de abastecimiento de agua potable de los distritos de Huancavelica y Ascensión, provincia y departamento de Huancavelica, Perú, respectivamente (Figura 1). La red de distribución consta de 10 sectores operacionales o zonas de suministro autónomas administradas y operadas por la empresa prestadora de servicios de saneamiento EMAPA Huancavelica S. A. Los sectores operacionales seleccionados fueron el sector 3 y sector 5, los cuales se encontraban abastecidos por una entrada de caudal ubicado al noroeste

del sector 5. Dichos sectores son zonas céntricas consolidadas y desarrollan mayor actividad comercial, estatal y privada.

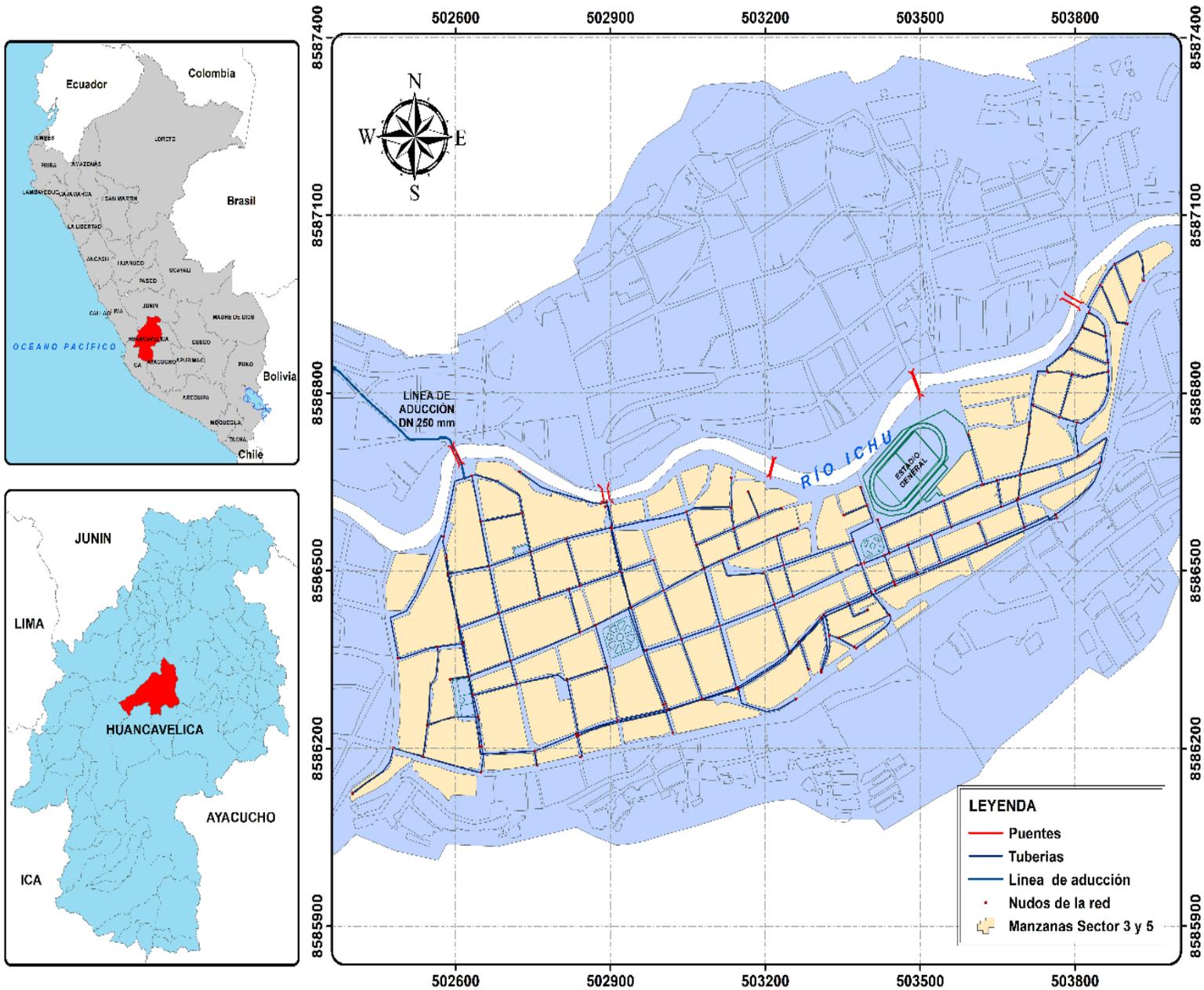


Figura 1. Zona de ubicación.

Optimización de redes de abastecimiento de agua

El problema de optimización multiobjetivo en este estudio se define de tal manera que el primer objetivo fue minimizar el costo de diseño de la red versus el segundo objetivo, que fue maximizar la confiabilidad hidráulica de toda la red.

Objetivo 1: minimizar el costo de diseño de la red

El costo de las tuberías se determinó con la Ecuación (1), que depende del costo del diámetro y de la longitud de la tubería (Saldarriaga, 2007):

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{NT} Cd_i L_i \quad (1)$$

Donde:

C_{total} = costo total de la red

NT = número de tuberías de la red

Cd_i = costo del diámetro por metro lineal de cada tubería particular

L_i = longitud de cada tubería particular

El costo total de la red está determinado por el índice de costo (Ecuación (2)), el cual es un valor adimensional que se encuentra en el rango de 0 a 1. Cuando tiende hacia 0 representa el costo mínimo, mientras que cuando se acerca a 1 indica el costo máximo:

$$I_C = \frac{C_{total} - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (2)$$

Donde:

I_C = índice de costo de la red

C_{total} = costo total de la red

C_{max} = costo máximo de la red

C_{min} = costo mínimo de la red

Objetivo 2: maximizar la confiabilidad hidráulica de la red

El concepto de confiabilidad en una función multiobjetivo todavía es un campo en investigación. Sin embargo, la confiabilidad se puede expresar mediante la "resiliencia", que es la capacidad intrínseca de un sistema para superar fallas. Está representado por el índice de resiliencia (I_r), para tener en cuenta que las redes de distribución de agua son sistemas diseñados en bucle, y es una manera de aumentar la confiabilidad hidráulica y la disponibilidad de agua durante posibles fallas de las tuberías (Todini, 2000). El índice de resiliencia de la red de acuerdo con la Ecuación (3) considera la uniformidad de diámetros en las tuberías y las presiones excedentes en los nudos (Prasad & Park, 2004):

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{nn} C_j Q_j (H_j - H_j^*)}{\sum_{r=1}^{nr} Q_r H_r - \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j^*} \quad (3)$$

Donde:

I_r = índice de resiliencia de la red

nn = número de nudos de la red

nr = número de reservorios de la red

C_j = coeficiente de conectividad

Q_j = caudal de demanda en cada nudo

H_j = altura piezométrica real

H_j^* = altura piezométrica ideal

Q_r = caudal entregado por el reservorio

H_r = la altura piezométrica del reservorio

Para este caso se buscan reducir ambos objetivos, razón por la cual el índice de resiliencia está dado por la Ecuación (4):

$$I_R = 1 - I_r \quad (4)$$

El índice de resiliencia (I_R) es un valor adimensional definido entre 0 y 1; si el índice de resiliencia supera el valor de 0.5, el sistema es muy vulnerable a fallas, fugas o rupturas en las tuberías. En caso de que la red tenga presiones negativas se considera con el valor de 1 y se entiende como una red no resiliente.

Número de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR})

La velocidad del fluido en las tuberías se consideró entre 0.6 y 3.0 m/s, en casos justificados hasta 5 m/s, y la presión dinámica no menor a 10 m, de columna de agua de acuerdo con la norma OS.050 (RNE, 2009).

Ecuación para el cálculo de la pérdida de presión en tuberías

Ecuación de Darcy-Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach, considerada una ecuación universal, destaca como una de las expresiones matemáticas más utilizadas para calcular la pérdida de presión en tuberías. Su amplitud radica en su relación tanto con las propiedades del fluido en movimiento como con el material del conducto, lo que permite su aplicación a una diversidad de materiales y diámetros de tuberías (Renata, Pereira, da Silva, Castro, & Saad, 2020):

$$H_f = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad (5)$$

Donde:

H_f = pérdida de carga debido a la fricción

f = factor de fricción de Darcy

l = longitud de la tubería

v = velocidad media de flujo

d = diámetro de la tubería

g = aceleración de la gravedad

Ecuaciones explícitas para calcular el factor de fricción

Ecuación de Colebrook-White

La ecuación de Colebrook es una fórmula matemática que relaciona el factor de fricción de un fluido que fluye a través de una tubería con el número de Reynolds y la rugosidad de la pared de la tubería. La ecuación de Colebrook es una ecuación empírica, lo cual significa que se basa en datos experimentales y no puede resolverse de forma explícita (Brkic & Praks, 2018):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \log \left(\frac{K_s}{3.7 d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

Donde:

f = factor de fricción de Darcy

K_s = rugosidad absoluta

Re = número de Reynolds

d = diámetro

Ecuación de Swamee y Jain

El principal desafío para obtener una solución directa radica en la naturaleza implícita de la ecuación de Colebrook-White, que rige la resistencia al flujo en tuberías de uso común. Esto implica la realización de una serie de pruebas y ajustes para lograr resultados de alta precisión (Swamee & Jain, 1976). En este contexto, Swamee y Jain desarrollaron una ecuación explícita para el factor de fricción, que ofrece una aproximación matemáticamente precisa de la ecuación de Colebrook-White. Dicha ecuación se ha convertido en un estándar en el campo de la ingeniería y se utiliza de modo amplia, como por ejemplo en aplicaciones como el *software* EPANET. La ecuación se representa de la siguiente forma:

$$f = \frac{0.25}{\left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (7)$$

Donde:

f = factor de fricción

ε = rugosidad de la tubería

d = diámetro de la tubería

Re = número de Reynolds

EPANET

Es un *software* diseñado para llevar a cabo el análisis hidráulico y evaluar el comportamiento de la calidad del agua en sistemas de distribución de agua bajo presión. Incorpora un simulador hidráulico avanzado fundamentado en el principio de conservación de la masa y en ecuaciones de pérdida de carga, lo que facilita la obtención de resultados confiables, incluso en redes de distribución de agua con un elevado número de nodos y tuberías. Además, incluye una caja de herramientas conocida como Toolkit, que consiste en una librería dinámica con una variedad de funciones. Esto posibilita a los usuarios desarrollar diversas aplicaciones en varios lenguajes de programación que necesiten llevar a cabo múltiples simulaciones hidráulicas o procesar información de manera más detallada (Rossman, 2000).

NSGA-II

Deb, Pratap, Agarwal Y Meyarivan (2002) desarrollaron el algoritmo genético Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II), el cual se caracteriza por su enfoque de clasificación rápida de soluciones no dominadas y la inclusión de un operador de selección que permite identificar las soluciones óptimas. Este algoritmo surge como una versión mejorada de su predecesor (NSGA-I), el cual fue mejorado respecto a su alta carga computacional, su enfoque no elitista y la necesidad de especificar un parámetro para garantizar la diversidad de soluciones.

NSGA-II ha demostrado excelentes resultados en la resolución de problemas complejos, pues logra una distribución de soluciones más

efectiva y una convergencia más rápida hacia el frente óptimo de Pareto. Por esta razón se ha convertido en la opción más popular y ampliamente utilizada en la optimización multiobjetivo, gracias a la implementación de nuevas y mejores estrategias de búsqueda. El esquema principal se detalla en la Figura 2.

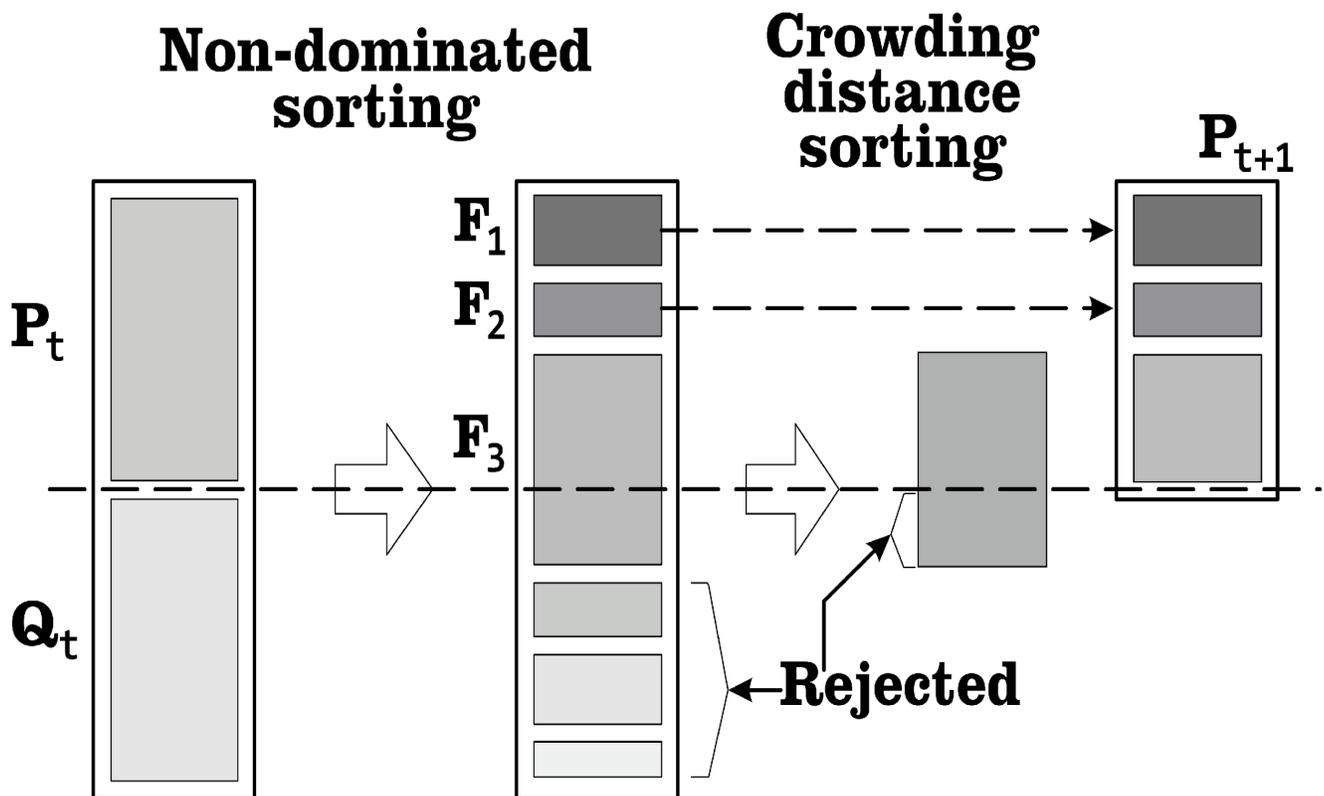


Figura 2. Proceso NSGA-II. Fuente: Deb *et al.* (2002).

El proceso del algoritmo inicia con la creación de una población aleatoria denominada P_0 (tamaño N). En la primera generación, esta población se convierte en la población padre, P_t (tamaño N). A través de operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación, se genera

una población descendiente Q_t (tamaño N). Luego, estas dos poblaciones se combinan para formar una población R_t (tamaño $2N$).

A continuación, se lleva a cabo un ordenamiento no dominado (non-dominated sorting) para categorizar los individuos en distintos frentes de Pareto. La nueva población se construye seleccionando individuos de estos frentes no dominados, comenzando con el mejor frente no dominado (F_1), seguido del segundo frente (F_2), tercer frente (F_3) y así sucesivamente hasta tener el número necesario de soluciones que conformen la nueva población (tamaño N).

Puede darse el caso de que el número de soluciones requerido para la nueva población sea compuesto por las soluciones de los primeros frentes y solo necesite parte del siguiente frente. Para ello, se debe seleccionar el número necesario de soluciones de dicho frente con base en la distancia de hacinamiento (crowding distance sorting), para así conservar la diversidad. Los frentes y las soluciones que no se consideraron se desechan. La población resultante P_{t+1} (tamaño N) se convierte en la nueva población padre P_t , la cual se prepara para repetir el procedimiento.

Ordenamiento no dominado

La clasificación no dominada es una técnica utilizada para asignar diferentes frentes de Pareto en una población de soluciones de acuerdo con sus relaciones de dominancia. Debido a que los individuos de la población en el primer frente tienen el valor máximo de aptitud, pueden

obtener más probabilidad de reproducción (Rahimi, Gandomi, Deb, Chen, & Nikoo, 2022).

Según Prasad y Park (2004), para un problema multiobjetivo, cualquiera de dos soluciones p y q puede presentar una de dos situaciones posibles: una puede dominar a la otra o ninguna dominar a la otra. Para establecer que una solución p domina a la solución q , se deben cumplir las siguientes condiciones: 1) la solución p es mejor que la solución q en todos los objetivos, o 2) la solución p es estrictamente mejor que la solución q en al menos un objetivo.

Para asignar los frentes de Pareto se analizan todas las soluciones entre sí; en primer lugar, cada solución posee dos parámetros: n_p (número de soluciones que dominan a la solución p) y S_p (conjunto de soluciones que p domina).

Ahora, se evalúa la solución p con cada solución q para calcular sus parámetros n_p y S_p . Si el valor de n_p es igual a 0, entonces la solución p se incluye en el primer frente no dominado. Este procedimiento se realiza hasta obtener los valores de n_p y S_p para todas las soluciones.

Cada valoración de p con $n_p = 0$ se evalúa con cada elemento del conjunto S_p de q y disminuye su cuenta de dominación en 1. Si en algún momento el contador de dominación de algún elemento llega a 0, se agrega a una lista denominada Q. Estos elementos constituyen el segundo frente no dominado. El proceso se repite para cada miembro de la lista Q, identificando así los frentes restantes de manera sucesiva.

Un frente no dominado puede estar conformado por una, dos o incluso más soluciones no dominadas. En las etapas iniciales del

algoritmo, es evidente que los primeros frentes contienen un conjunto reducido de soluciones no dominadas. No obstante, a medida que el proceso avanza a través de un mayor número de generaciones, se observa que los primeros frentes comienzan a aumentar su conjunto de soluciones no dominadas hasta que finalmente solo exista un frente. Cuando ya no sea posible mejorar un objetivo sin perjudicar al otro, este será el conjunto de soluciones óptimas, el cual se denomina solución óptima de Pareto (Gunantara, 2018).

Distancia de hacinamiento

La distancia de hacinamiento, basado en la diversidad de soluciones, es un mecanismo para asegurar una buena distribución de soluciones en cada generación, para evitar aglomeración y superposición de soluciones. Su fórmula está representada por la Ecuación (8) (Peñuela & Granada, 2007):

$$d_i = \sum_{m=1}^M \left| \frac{f_m^{(i+1)} - f_m^{(i-1)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right| \quad (8)$$

Donde:

d_i = distancia de hacinamiento de cada individuo

$f_m^{(i+1)}$ y $f_m^{(i-1)}$ = i -ésimos valores objetivo para las dos soluciones adyacentes

f_m^{max} y f_m^{min} = valores de aptitud máxima y mínima

M = número de objetivos

Distancia de hacinamiento modificada

Se plantea una alternativa a la distancia de hacinamiento inicial, realizando una modificación en su ecuación. Por lo tanto, para un conjunto de soluciones en competencia, la alternativa que introduce mayor nivel de diversidad es la que tiene mayor distancia de hacinamiento (Chu & Yu, 2018):

$$d_i = \sum_{m=1}^M \left| \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_i^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right| \quad (9)$$

Comparado con la ecuación inicial, la nueva definición solo convierte $f_m^{(I_{i-1}^m)}$ en $f_m^{(I_i^m)}$. Este cambio hereda todas las ventajas de la distancia de hacinamiento inicial y no requiere de otra modificación sustancial. Si se usa el ejemplo (Figura 3), la distancia de hacinamiento de la solución F es el pequeño rectángulo al igual que la solución E, lo cual no es del todo cierto. En la nueva definición, ya sea que una solución se encuentre en el punto E o F hace la diferencia, la primera tendrá alta prioridad para ser seleccionado, lo que compensaría la desventaja de la ecuación inicial.

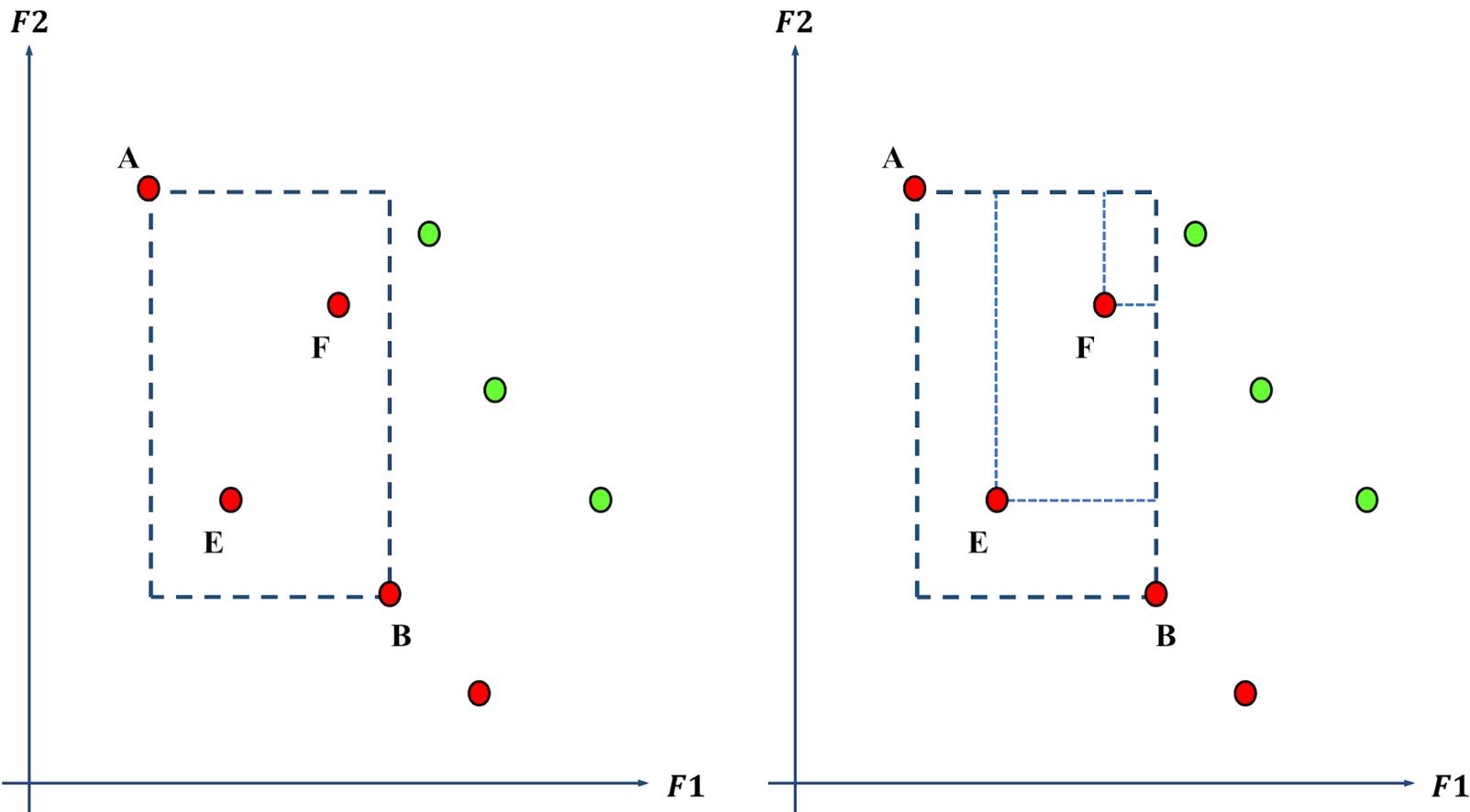


Figura 3. Distancia de hacinamiento normal y mejorada. Fuente: Chu y Yu (2018).

Parámetros del algoritmo genético NSGA-II

De acuerdo con el estudio de Wang *et al.* (2019), los parámetros más importantes de NSGA-II para el diseño de redes poseen un rango de valores recomendados y se jerarquizan de la siguiente manera:

- **Tamaño de la población:** es el parámetro principal y se recomienda utilizar un valor razonablemente grande que dependa de la escala del problema de diseño, a fin de mejorar la diversidad poblacional y

reducir el riesgo de quedar atrapado en óptimos locales. Para el caso de estudio, se utilizó el valor de 50, que incluye, además de los pobladores aleatorios, a un poblador constituido por los mayores diámetros disponibles y otro con los menores diámetros disponibles.

- **Cruce binario simulado y mutación polinomial:** son parámetros importantes, pues afectan la posición de los descendientes generados a partir de sus padres. Teniendo en cuenta la naturaleza discreta de los problemas de diseño de redes, sus rangos deben mantenerse entre 1 y 20. Para el caso de estudio, se utilizó cruce y mutación en un punto aleatorio.
- **Probabilidad de cruzamiento y probabilidad de mutación:** tienen un impacto menor en la efectividad de NSGA-II, es decir, no requieren de ajuste fino; se recomienda usar valores altos de la probabilidad de cruzamiento (aproximadamente 0.9) y valores pequeños de la probabilidad de mutación (valor igual a la inversa del número de variables de decisión o valores entre 0.001 y 0.05). Para este caso, se utilizó una probabilidad de cruzamiento de 35 %, a fin de no alterar de manera sustancial las características de padres hacia los descendientes. También se empleó la probabilidad de mutación de 0.05.

Parámetros de la red de distribución de agua potable

Se empleó el *software* EPANET como motor de cálculo hidráulico, el cual utiliza implícitamente las ecuaciones (5) y (7) para el cálculo de la pérdida de presión en nudos de la red. Además, se consideraron los valores de

viscosidad cinemática $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, rugosidad absoluta 0.0015 mm, presión mínima requerida en los nudos de 10 m de columna de agua y no se tomaron en cuenta pérdidas menores en las tuberías.

Esquema metodológico

La Figura 4 muestra el esquema metodológico.

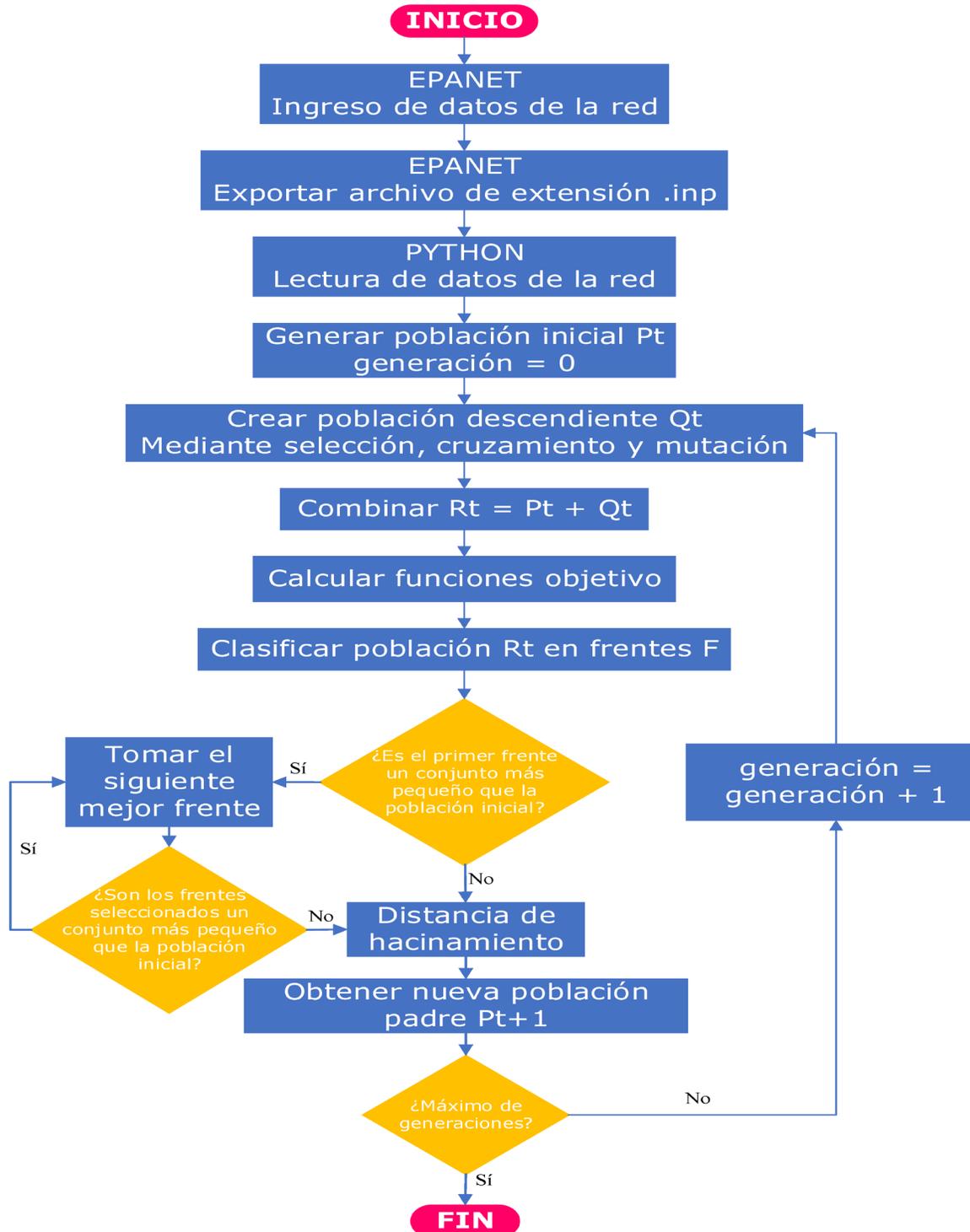


Figura 4. Esquema metodológico.

Resultados

Diseño de la red de Hanoi (red de verificación de código implementado)

Se llevó a cabo la simulación de esta red para 500 generaciones, acompañado de los parámetros de NSGA-II y parámetros de la red, evaluando las dos funciones objetivo I_R e I_C , cuyos valores oscilan entre 0 y 1. Para la investigación se buscó reducir ambos índices; es decir, se priorizó un valor más cercano a 0. En la Tabla 1 se muestran los índices obtenidos con NSGA-II y su variación respecto a otros algoritmos. También se mostraron datos como el costo y el número de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR}), para complementar las variaciones (Δ) en distintos campos.

Tabla 1. Comparación del índice de resiliencia (I_R) e índice de costo (I_C) obtenidos con NSGA-II vs. citados en la literatura científica.

Algoritmos	I_R	I_C	Costo (M USD)	N_{RIR}
NSGA-II	0.48	0.46	6.04	4
Savic y Walters (1997) GA 1	0.51	0.47	6.07	7
Δ respecto a NSGA-II	0.03	0.01	0.03	3
Savic y Walters (1997) GA 2	0.49	0.48	6.19	6
Δ respecto a NSGA-II	0.01	0.02	0.15	2
Cunha y Sousa (1999)	0.51	0.46	6.06	7
Δ respecto a NSGA-II	0.03	0	0.02	3
Liong y Atiquzzaman (2004)	0.49	0.48	6.22	5
Δ respecto a NSGA-II	0.01	0.02	0.18	1
Suribabu y Neelakantan (2014)	0.51	0.47	6.08	6
Δ respecto a NSGA-II	0.03	0.01	0.04	2

Al comparar los índices obtenidos de NSGA-II respecto a Savic y Walters (1997) GA 1, se obtuvo una reducción del I_R en 0.03 y del I_C en 0.01, reflejado en la diferencia de costo de USD 0.03M y la disminución de N_{RIR} en 3. Con relación a Savic y Walters (1997) GA 2, se logró una disminución del I_R en 0.01 y del I_C en 0.02, traducido en la diferencia de costo de USD 0.15M, y una disminución del N_{RIR} en 2. En cuanto a Cunha y Sousa (1999), se alcanzó una minoración del I_R en 0.03 y del I_C solo una leve reducción, lo que evidencia la diferencia de costo de USD 0.02M, y una disminución de N_{RIR} en 3. Acerca de Liong y Atiquzzaman (2004), se consiguió una minimización del I_R en 0.01 y del I_C en 0.02, lo cual

muestra la diferencia de costo de USD 0.18M, y una disminución de N_{RIR} en 1. Sobre Suribabu y Neelakantan (2014), se llegó a una reducción del I_R en 0.03 y de I_C en 0.01, lo que indica la diferencia de costo de USD 0.04M, y la disminución de N_{RIR} en 3. Por lo tanto, NSGA-II fue capaz de reducir ambos índices mejor que los otros algoritmos, lo que permitió su validación y poder emplearlo en una red real.

Diseño de la red de Huancavelica

La red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica consta de un total de 186 tuberías y 144 nudos interconectados alimentados por una entrada de caudal. Los diámetros comerciales de las tuberías utilizados para la simulación y sus respectivos costos por metro lineal se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Diámetros comerciales de la red de Huancavelica.

Diámetro (pulg)	Diámetro interno (mm)	Costo por ml (USD)
2 1/2	71.2	3.42
3	85.6	4.88
4	104.6	7.32
5	133	12.28
6	152	15.38
8	190.2	24.03

Se hizo la simulación para 2 000 generaciones con los parámetros de NSGA-II y parámetros de la red. Culminada la ejecución del código principal, se obtuvo el conjunto de índices de costo, resiliencia, costo total y número de restricciones incumplidas de la red, y se generó una distribución de soluciones adecuada en el frente de Pareto. La evolución de soluciones se muestra en el historial de generaciones (Figura 5).

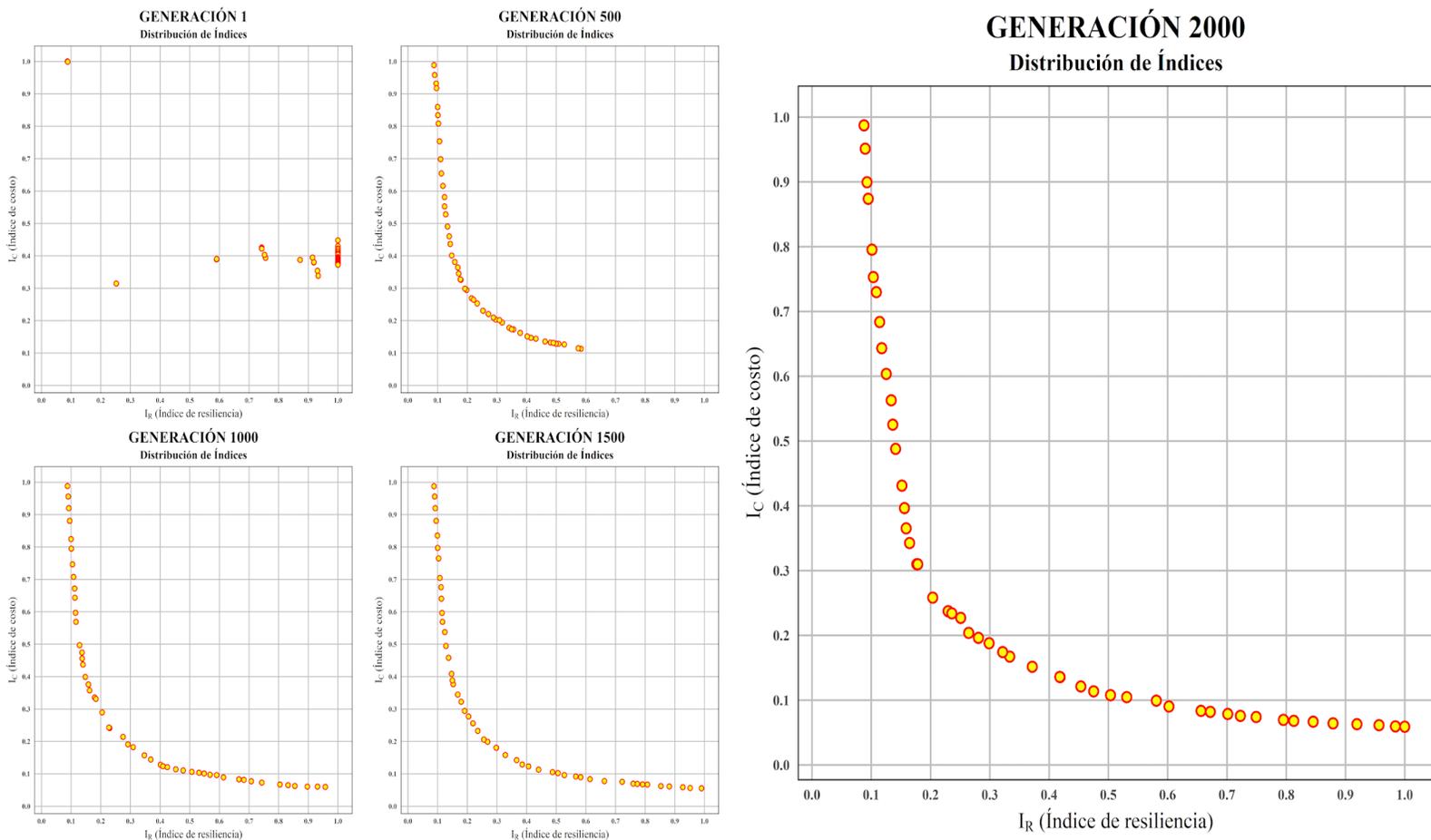


Figura 5. Historial de generaciones para la red de Huancavelica.

La generación 2000 es la última de acuerdo con los parámetros de ingreso para la ejecución del código principal. Se puede ver que las soluciones van evolucionando y tomando una forma exponencial descendente, donde mientras haya reducción del I_R se incrementa el I_C , y viceversa. Los resultados más equilibrados tienen aproximación hacia el punto de origen de coordenadas o punto (0, 0). Las soluciones obtenidas en la última generación se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Soluciones de la generación 2000 (final).

Núm.	I _R	I _C	Costo (USD)	N _{RIR}	Núm.	I _R	I _C	Costo (USD)	N _{RIR}
1	0.09	0.99	336 166.43	172	26	0.30	0.19	103 128.84	108
2	0.09	0.95	325 630.35	172	27	0.32	0.17	99 138.78	105
3	0.09	0.90	310 576.66	171	28	0.33	0.17	97 172.82	107
4	0.09	0.87	303 110.24	170	29	0.37	0.15	92 547.08	105
5	0.10	0.80	280 232.61	167	30	0.42	0.14	87 938.59	101
6	0.10	0.75	267 928.35	168	31	0.42	0.14	87 923.50	101
7	0.11	0.73	261 162.18	168	32	0.45	0.12	83 714.91	106
8	0.11	0.68	247 699.35	161	33	0.48	0.11	81 506.15	100
9	0.12	0.64	235 939.26	161	34	0.50	0.11	79 761.86	108
10	0.13	0.60	224 303.18	158	35	0.53	0.10	78 855.15	102
11	0.13	0.56	212 426.03	153	36	0.58	0.10	77 310.25	130
12	0.14	0.53	201 493.02	157	37	0.60	0.09	74 698.59	113
13	0.14	0.49	190 607.66	154	38	0.66	0.08	72 689.03	121
14	0.15	0.43	174 102.36	144	39	0.67	0.08	72 242.13	120
15	0.16	0.40	163 938.80	143	40	0.70	0.08	71 278.49	138
16	0.16	0.37	154 867.43	140	41	0.72	0.08	70 443.26	147
17	0.16	0.34	148 204.94	142	42	0.75	0.07	69 898.55	145
18	0.18	0.31	138 695.06	128	43	0.80	0.07	68 654.22	144
19	0.18	0.31	138 655.72	128	44	0.81	0.07	68 193.11	146
20	0.20	0.26	123 627.87	119	45	0.85	0.07	67 810.91	149
21	0.23	0.24	117 590.12	111	46	0.88	0.06	67 067.48	158
22	0.24	0.23	116 605.64	110	47	0.92	0.06	66 705.20	162
23	0.25	0.23	114 588.51	109	48	0.96	0.06	66 236.64	160
24	0.26	0.20	107 791.51	105	49	0.98	0.06	65 729.22	164
25	0.28	0.20	105 566.83	103	50	1.00	0.06	65 599.40	167

La selección de la solución óptima dependerá de las necesidades del diseñador, ya sea que se busque una red con alta confiabilidad y elevado costo, o una red con índices equilibrados. Asimismo, cabe recalcar que los índices están representados numéricamente en el rango de 0 a 1, siendo el índice más cercano a 0 el más óptimo; de igual manera, es recomendable que cada uno de los índices esté por debajo de 0.5 para garantizar un buen resultado. Para la investigación, se buscó una solución que contenga índices equilibrados, donde prime un bajo I_R , por consiguiente, la seleccionada fue la núm. 21, que cuenta con un índice de resiliencia $I_R = 0.23$ y un índice de costo $I_C = 0.24$, ambos por debajo de 0.5 y más equilibrados en comparación con las demás soluciones.

Discusión

Comparación de índices entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

En la red de Huancavelica, los resultados obtenidos se evaluaron mediante el índice de resiliencia, índice de costo y otros datos complementarios (Tabla 4).

Tabla 4. Índices de la red Huancavelica optimizada y no optimizada.

	Red optimizada	Red no optimizada	Δ
Índice de resiliencia (I_R)	0.23	0.25	0.02
Índice de costo (I_C)	0.24	0.31	0.07
Costo total (USD)	117 590.12	140 099.89	22 509.77
Número restricciones incumplidas de la red (N_{RIR})	111	132	21

Al comparar los valores de la red no optimizada con los valores obtenidos de la aplicación de NSGA-II en la red de Huancavelica (red optimizada), se obtuvo una reducción del I_R en 0.02 o 2% y una disminución de I_C en 0.07 o 7 %, lo cual evidencia la diferencia de costo de USD 22 509.77, y una minoración del N_{RIR} en 21, todo a favor de la red optimizada.

Comparación del mecanismo de “distancia de hacinamiento” entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

En la Figura 6 se muestra la distribución de índices obtenidos con la distancia de hacinamiento modificada respecto a cuatro hallados al utilizar la distancia de hacinamiento inicial.

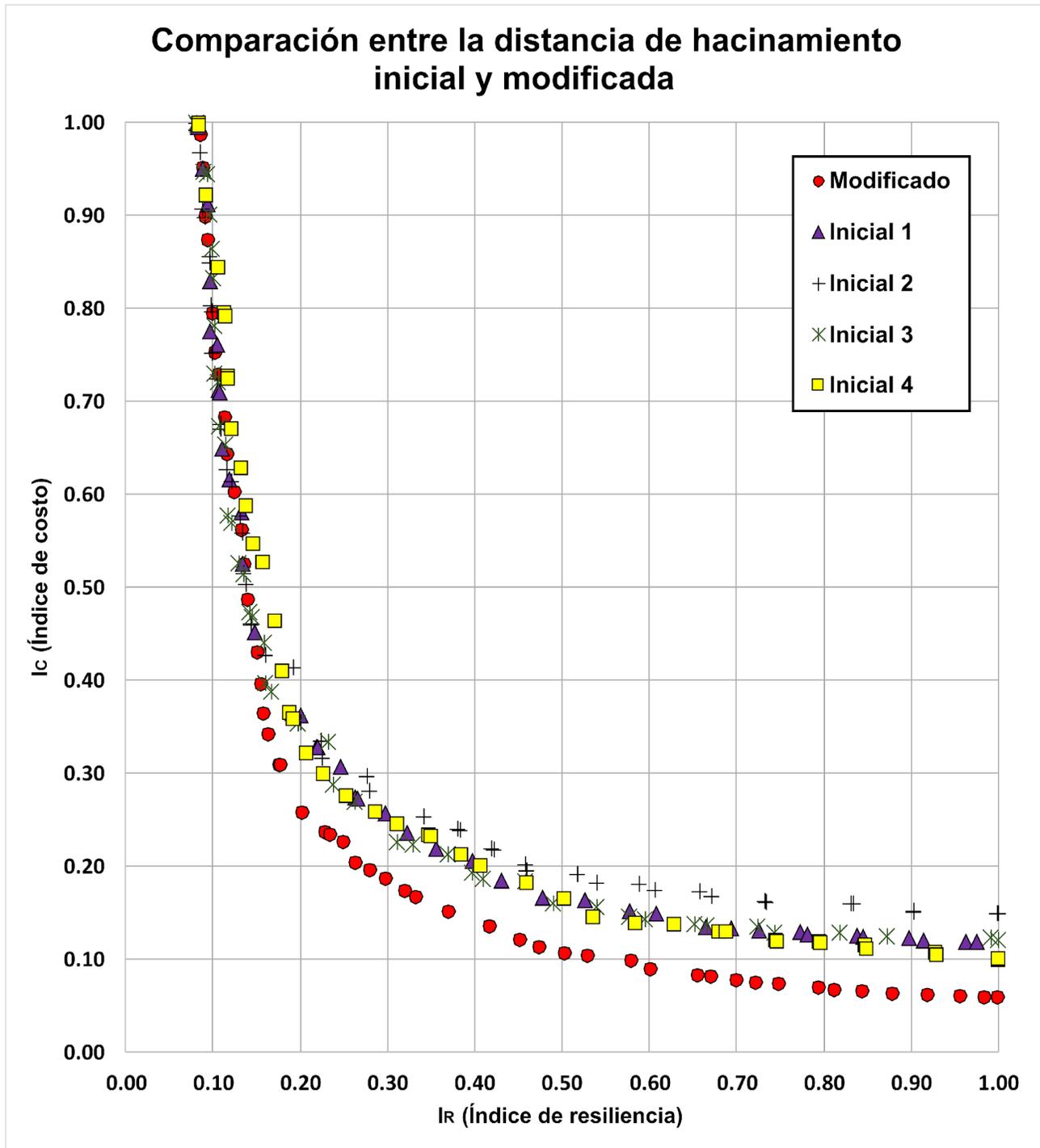


Figura 6. Comparación gráfica del mecanismo de “distancia de hacinamiento” empleada en el diseño de la red de Huancavelica.

En la Tabla 5 se compara la solución seleccionada resultante del uso de la distancia de hacinamiento modificada en relación con cuatro soluciones producto de la distancia de hacinamiento inicial, en la que se evaluó la distancia de la solución al origen, I_R , I_C , costo total y número de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR}):

Tabla 5. Comparación de valores de “distancia de hacinamiento” empleada en el diseño de la red de Huancavelica.

	Distancia de hacinamiento mejorada	Distancia de hacinamiento Inicial 1	Distancia de hacinamiento Inicial 2	Distancia de hacinamiento Inicial 3	Distancia de hacinamiento Inicial 4
Distancia del origen a la solución	0.33	0.38	0.39	0.38	0.38
Índice de resiliencia (I_R)	0.23	0.26	0.23	0.24	0.25
Índice de costo (I_C)	0.24	0.28	0.32	0.29	0.28
Costo total (USD)	117 590.12	128 603.70	140 227.62	134 339.66	130 126.59
Numero de restricciones incumplidas de la red (N_{RIR})	111	139	132	134	135

Las soluciones más equilibradas se aproximan al punto de origen (0, 0). El uso de la distancia de hacinamiento mejorada permitió disminuir la distancia al origen de la solución seleccionada con un valor de 0.33, la cual es menor que todas las obtenidas por la distancia de hacinamiento inicial. De igual manera, el I_R de 0.23 y el I_C de 0.24 son menores, por ende, mejores que todas las obtenidas con la distancia de hacinamiento

inicial. También el N_{RIR} hallado por la distancia de hacinamiento mejorada es menor a todos las demás.

Comparación de diámetros entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

Se comparan los diámetros utilizados de la red actual y la red optimizada de Huancavelica (Figura 7).

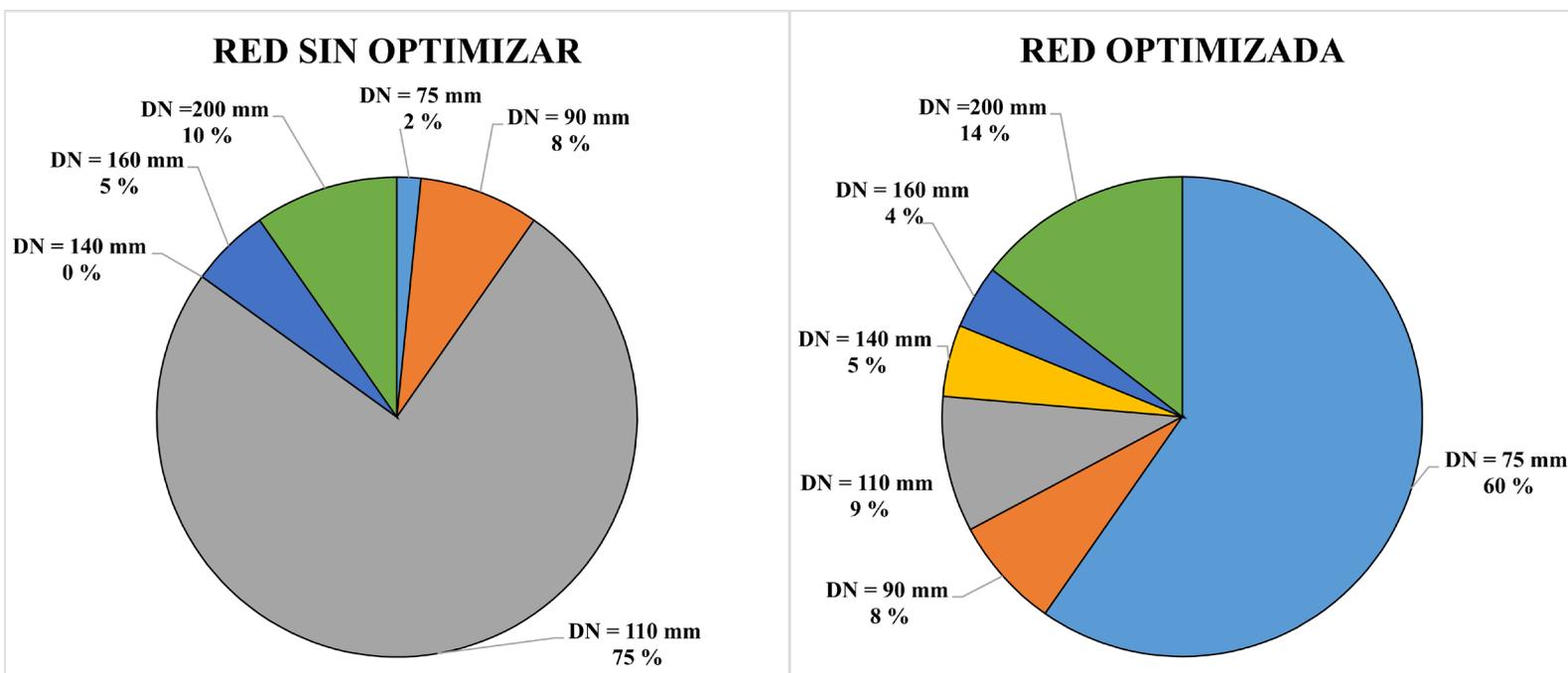


Figura 7. La variación entre los diámetros de la red actual y la red optimizada.

Se presentaron cambios en los porcentajes de uso de los diámetros de tuberías de la red optimizada en comparación con la red sin optimizar. Para el diámetro de 200 mm, la red optimizada presentó un uso del 14 %, mientras que la red sin optimizar un 10 %, una diferencia del 4 % en favor de la red sin optimizar. Para el diámetro de 160 mm, la red optimizada mostró un uso del 4 % y la red sin optimizar un 5 %, una leve diferencia del 1 % en favor de la primera. Para el diámetro de 140 mm, la red optimizada seleccionó un 5 % y la red sin optimizar un 0 %, lo que hace una diferencia de 5 % en favor de la red sin optimizar. Para el diámetro de 110 mm, la red optimizada eligió un 9 % y la red sin optimizar un 75 %, una diferencia considerable del 66 % en favor de la red optimizada. Para el diámetro de 90 mm, ambos obtuvieron un 8 %. Para el diámetro de 75 mm, la red optimizada presentó un 60 % y la red sin optimizar un 8 %, una diferencia del 52 % en favor de esta última.

Comparación de velocidades entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

Las velocidades en las tuberías de la red actual y la red optimizada de Huancavelica son comparadas (Figura 8).

COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE VELOCIDADES

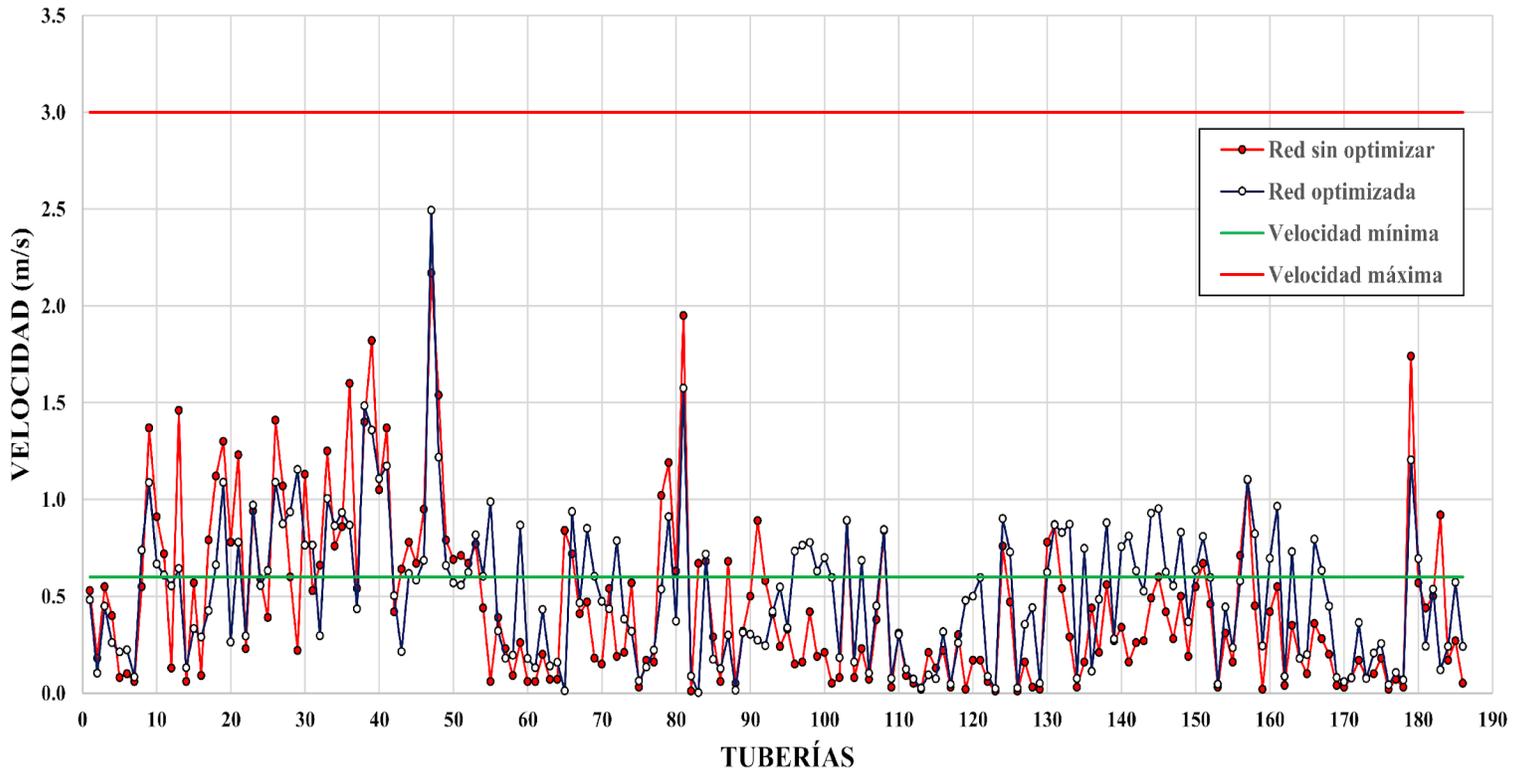


Figura 8. Comparación de las velocidades en las tuberías de la red actual y la red optimizada de Huancavelica.

La red no optimizada contó con 131 tuberías, cuyas velocidades se encuentran por debajo de los 0.6 m/s, que representa el 70 %; por otro lado, la red optimizada mostró 111 tuberías, que simbolizan el 60 %. Entonces, se muestra una mejora del 10 % en velocidades del fluido en las tuberías.

Comparación de presiones entre la red de Huancavelica optimizada y no optimizada

También se compararon las presiones en los nudos de la red actual y la red optimizada de Huancavelica (Figura 9).

COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE PRESIONES

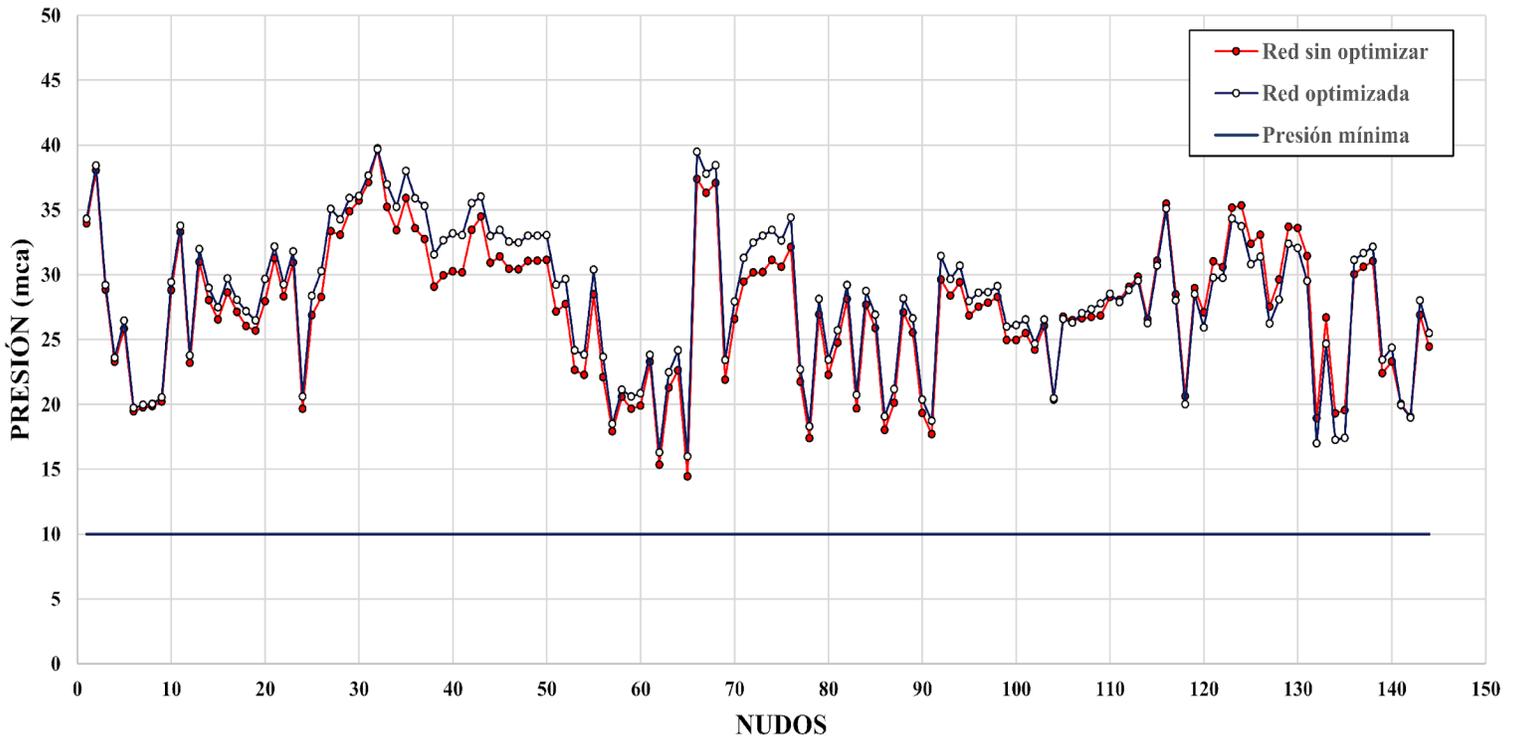


Figura 9. Comparación de las presiones en los nudos de la red actual y la red optimizada de Huancavelica.

Todas las presiones en los nudos de la red están por encima de los 10 m de columna de agua, valor recomendado por la norma OS-050. El rango de presiones de la red sin optimizar oscila entre 14.95 y 39.76

m.c.a., mientras que de la red optimizada entre 15.98 y 39.76 m.c.a. Se muestra una leve mejora de las presiones en los nudos en favor de la red optimizada.

Conclusiones

Se ha determinado que el algoritmo genético de clasificación no dominada II(NSGA-II) es favorable para el diseño óptimo de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica; esto, al considerar dos funciones objetivo de costo y confiabilidad hidráulica, pues su proceso iterativo de selección de diámetros permite de forma simultánea minimizar el costo y aumentar la confiabilidad; a su vez, cumple con las restricciones hidráulicas de presiones en nudos y velocidades del fluido en las tuberías de acuerdo con la Norma Técnica Peruana OS.050. También el uso de la distancia de hacinamiento mejorada ayudó a obtener resultados óptimos en ambos índices.

El costo se logró disminuir en un 7 %, valor que aminora en USD 22 509.77 el costo de la red actual. En cuanto a la confiabilidad hidráulica, se obtuvo una red 2 % más confiable que la actual.

Al realizar la modificación de la distancia de hacinamiento, se logró mejorar la distribución dentro del espacio de soluciones, además de mejorar los valores de índice de costo, resiliencia y número de restricciones incumplidas de la red.

En los diámetros de tuberías seleccionados hubo cambios considerables, con una diferencia del 66 % en favor de la red optimizada

para el diámetro de 90 mm y un 52 % en favor de la red actual para el diámetro de 75 mm.

La cantidad de velocidades del fluido de la tubería que se encontraban fuera del rango establecido por la norma logró una disminución del 10 %.

Las presiones en los nudos de la red incrementaron su valor, que iba de 14.95 a 39.76 m.c.a., por un nuevo intervalo de 15.98 a 39.76 m.c.a.

Agradecimiento

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Huancavelica-Perú.

Referencias

- Brkic, D., & Praks, P. (2018). Accurate and efficient explicit approximations of the colebrook flow friction equation based on the wright ω -function. *Mathematics*, 7(1). DOI: 10.3390/math7010034
- Chu, X., & Yu, X. (2018). *Improved crowding distance for NSGA-II*. DOI: 10.48550/arxiv.1811.12667
- Cunha, M. C., & Sousa, J. (1999). Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(215)

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2). DOI: 10.1109/4235.996017

EMAPA-HVCA, S. A. (2018). *Plan maestro (2018-2047)*. Huancavelica, Perú: EPS EMAPA Huancavelica. Recuperado de https://www.emapahvca.com/muni.php/ver_documento/id/munihvca7b8c6de4d949b3e51c816a1d5173de5b.pdf/

Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1). DOI: 10.1080/23311916.2018.1502242

Liong, S. Y., & Atiquzzaman, M. (2004). Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. *Journal of The Institution of Engineers, Singapore*, 44(1), 93-107.

Ostfeld, A. (2015). Water distribution networks. *Studies in Computational Intelligence*, 565. DOI: 10.1007/978-3-662-44160-2_4

Parvaze, S., Kumar, R., Khan, J. N., Al-Ansari, N., Parvaze, S., Vishwakarma, D. K., Elbeltagi, A., & Kuriqi, A. (2023). Optimization of water distribution systems using genetic algorithms: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. DOI: 10.1007/s11831-023-09944-7

Peñuela, C. A., & Granada, M. (2007). Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (NSGA-II). *Scientia et Technica*, 13(35), 175-180.

- Prasad, T. D., & Park, N.-S. (2004). Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1). DOI: 10.1061/(asce)0733-9496(2004)130:1(73)
- Rahimi, I., Gandomi, A. H., Deb, K., Chen, F., & Nikoo, M. R. (2022). Scheduling by NSGA-II: Review and bibliometric analysis. *Processes*, 10. DOI: 10.3390/pr10010098
- Renata, R. T., Pereira, F. F. S., Da Silva, T. B. G., Castro, E. R., & Saad, J. C. C. (2020). The performance of explicit formulas for determining the darcyweisbach friction factor. *Engenharia Agricola*, 40(2). DOI: 10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P258-265/2020
- RNE, Reglamento Nacional de Edificaciones. (2009). *Redes de distribución de agua para consumo humano (OS.050)*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones. Recuperado de <https://ww3.vivienda.gob.pe/ejes/vivienda-y-urbanismo/documentos/Reglamento%20Nacional%20de%20Edificaciones.pdf>
- Rossman, L. A. (September, 2000). *EPANET 2 Users Manual EPA/600/R-00/57*. Washington, DC, USA: Water Supply and Water Resources Division, U.S. Agency, Environmental Protection.
- Saldarriaga, J., Páez, D., Salcedo, C., Cuero, P., López, L. L., León, N., & Celeita, D. (2020). A direct approach for the near-optimal design of water distribution networks based on power use. *Water*, 12(4). DOI: 10.3390/W12041037

- Saldarriaga, J., Salcedo, C., González, M. A., Ortiz, C., Wiesner, F., & Gómez, S. (2022). On the evolution of the optimal design of WDS: Shifting towards the use of a fractal criterion. *Water*, 14(23), 3795. DOI: 10.3390/W14233795/S1
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes, riegos*. Bogotá, Colombia: Alfaomega.
- Sangroula, U., Han, K. H., Koo, K. M., Gnawali, K., & Yum, K. T. (2022). Optimization of water distribution networks using genetic algorithm based SOP-WDN Program. *Water*, 14(6). DOI: 10.3390/w14060851
- Savic, D. A., & Walters, G. A. (1997). Genetic algorithms for leastcost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67)
- Suribabu, C. R., & Neelakantan, T. R. (2014). Optimal upgradation and expansion of existing water distribution networks using differential evolution algorithm. *Asian Journal of Applied Sciences*, 7(6). DOI: 10.3923/ajaps.2014.375.390
- Swamee, P. K., & Jain, A. K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 102(5). DOI: 10.1061/jyceaj.0004542
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2). DOI: 10.1016/s1462-0758(00)00049-2

- Wang, Q., Guidolin, M., Savic, D., & Kapelan, Z. (2015). Two-objective design of benchmark problems of a water distribution system via MOEAs: Towards the best-known approximation of the true Pareto front. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3). DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000460
- Wang, Q., Wang, L., Huang, W., Wang, Z., Liu, S., & Savić, D. A. (2019). Parameterization of NSGA-II for the optimal design of water distribution systems. *Water*, 11(5). DOI: 10.3390/w11050971
- Wright, R., Parpas, P., & Stoianov, I. (2015). Experimental investigation of resilience and pressure management in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 119(1). DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.917
- Yazdandoost, F., & Izadi, A. (2016). A decision-making framework for designing water distribution networks based on multi-objective optimisation. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 6(4). DOI: 10.1504/IJMCDM.2016.081379
- Zarei, N., Azari, A., & Heidari, M. M. (2022). Improvement of the performance of NSGA-II and MOPSO algorithms in multi-objective optimization of urban water distribution networks based on modification of decision space. *Applied Water Science*, 12(6), 1-12. DOI: 10.1007/S13201-022-01610-W/TABLES/5
- Zheng, F., Zecchin, A. C., Maier, H. R., & Simpson, A. R. (2016). Comparison of the Searching Behavior of NSGA-II, SAMODE, and Borg MOEAs applied to water distribution system design problems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(7). DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000650

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-05

Artículos

Diagnóstico ágil para determinar la concordancia entre una tecnología de reciclado de aguas grises, y las necesidades específicas de clientes y usuarios potenciales

Agile diagnostics to determine the concordance between a technology for greywater recycling and the respective needs of potential customers and users

José Fernando Guillén¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5353-8838>

Elvia Breña², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8313-7069>

Edith Juárez³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1501-0434>

¹CIATEQ, A.C. Querétaro, Querétaro, México, jose.guillen@ciateq.mx

²CIATEQ, A.C. Querétaro, Querétaro, México, elvia.brena@ciateq.mx

³CIATEQ, A.C. Querétaro, Querétaro, México, ejuaraz@ciateq.mx

Autor para correspondencia: José Fernando Guillén,
jose.guillen@ciateq.mx

Resumen

La investigación de mercado y clientes para justificar el desarrollo de productos tecnológicos es clave en todas las organizaciones con un programa de innovación tecnológica efectiva. Estos estudios pueden implicar gran cantidad de recursos humanos, financieros y de tiempo. El artículo propone un estudio preliminar del perfil de usuarios y clientes potenciales (EXAPERC) a través de dos herramientas: DIAG-USUARIO, que sirve como un sondeo ágil de la percepción de los usuarios respecto de una solución tecnológica; y DIAG-CLIENTE, que consiste en un estudio preliminar de clientes potenciales de la tecnología (la empresa que fabricará productos con la tecnología en cuestión). Dichos diagnósticos se aplicaron para una solución al reciclado de aguas grises domésticas, realizado en CIATEQ, centro público de investigación en México. Los resultados mostraron una percepción positiva al concepto tanto por parte de los usuarios como de posibles inversionistas o clientes de la tecnología. Tales resultados alientan a llevar a cabo estudios más detallados de usuarios potenciales y de inversionistas de la tecnología en cuestión.

Palabras clave: estudio de mercado, innovación tecnológica, productos tecnológicos, clientes de la tecnología, aguas grises.

Abstract

Market and customer research for technological products is a key process in all organizations with an effective innovation program. Carrying out such studies could represent a large amount of human, financial and time resources. This article proposes the implementation of a preliminary study of potential users and customers, applying two surveys: DIAG-USER,

which serves as an agile study of the perception regarding a technological solution, and DIAG-CLIENT, a preliminary study of potential customers of the technology (the company which would manufacture products with such technology). These examinations were applied to a technological solution for gray water recycling, the development of a public research center in Mexico (CIATEQ). The results showed that there is indeed a positive perception of the solution, for both users and potential investors. These results encourage more detailed studies on both potential users and possible investors for a given technology.

Keywords: Market research, technological innovation, technology products, technology customers, greywater.

Recibido: 22/03/2023

Aceptado: 13/11/2023

Publicado *online*: 29/11/2023

Introducción

Es generalmente aceptado que la investigación y el desarrollo para la innovación de productos y servicios es una actividad fundamental de la sociedad para lograr su desarrollo. La identificación de clientes y mercados para los productos tecnológicos generados sigue siendo un reto crucial para las unidades de investigación y desarrollo tanto públicas como privadas.

La integración del cliente en los procesos de desarrollo de nuevos productos tanto radicales como convencionales ha sido extensamente

investigada. En el compendio presentado por Schweitzer, Van-den-Hende y Hultink (2020), los autores afirman que el valor de integrar a los clientes es ampliamente aceptado en nuevos productos incrementales. Sin embargo, esta práctica para nuevos productos disruptivos o radicales es más ambigua. Hay un sector de implementadores que considera que los clientes carecen de las herramientas y conocimiento necesarios para contribuir de manera efectiva en el desarrollo de nuevos productos radicales. No obstante, algunas compañías, como 3M y Lego, han incorporado a clientes en sus ejercicios de diseño de productos radicales (Schweitzer *et al.*, 2020).

El descubrimiento del cliente es uno de los modelos de identificación de clientes y mercados, a través del cual los emprendedores validan una hipótesis de modelo de negocios, vía un modelo de entrevistas con clientes potenciales (Batova, Clark, & Card, 2016).

El proceso del descubrimiento del cliente es un método usado para determinar si existen clientes para un producto y/o servicio (Thamjamrassri *et al.*, 2018), además de proporcionar información sobre las necesidades de clientes reales y potenciales antes de desarrollar un producto o servicio.

El proceso de descubrimiento del cliente consiste en desarrollar un Canvas del modelo de negocios que incorpore múltiples hipótesis y entonces se procede a probar estas hipótesis a través de extensivas entrevistas con clientes (Batova *et al.*, 2016). El esquema de "lean start up" promueve que el proceso se realice a través de entrevistas "cara a cara", ya sea en el lugar de trabajo del cliente, la organización emprendedora o, de forma alternativa, en un lugar neutral. La clave del método de entrevista consiste en evitar hablar de productos o soluciones

durante la entrevista, para no sesgar el resultado de la misma. Alternativamente, el entrevistador debe enfocarse en “los puntos de dolor” del cliente, así como en encontrar si el cliente define sus problemas e intereses de forma que se alinee con la oferta de valor de la organización emprendedora. Otra meta de las entrevistas consiste en precisar el rango de clientes potenciales (Batova *et al.*, 2016). Thamjamrassri *et al.* (2018) aplicaron el modelo de “descubrimiento del cliente” al desarrollo de soluciones de tecnologías de información para el sector salud. El método de “descubrimiento del cliente” tiene varias ventajas y beneficios derivados de contrastar la oferta de valor con un grupo de clientes específicos. Sin embargo, existen otros métodos de conocimiento del cliente que buscan aprovechar la gran disponibilidad de información de usuarios de productos y servicios a través de las redes sociales. Tal es el caso del estudio descrito por Trappey, Trappey, Fan y Lee (2018), en el cual se estudian los requerimientos y las necesidades de usuarios (p. ej., la “voz del cliente”) de teléfonos y relojes inteligentes.

York y Danes (2014) describen las diferencias entre tres de los enfoques para determinar el perfil del cliente: 1) desarrollo de nuevos productos (o “New Product Development”, por sus siglas en inglés NPD); 2) inicio difuso (o “Fuzzy Front End”, por sus siglas en inglés, FFE), y 3) desarrollo de clientes. York y Danes (2014) concluyen que el desarrollo de clientes es un modelo colaborativo, basado en el planteamiento de una hipótesis del concepto de negocio, descrito en términos de un “Canvas” del negocio, que tiene el propósito de obtener un “producto mínimo viable”, y fuertemente orientado a realizar actividades en estrecho contacto con los clientes potenciales. El “producto mínimo viable” es

descrito por York y Danes (2014) como aquel producto con los mínimos atributos para poder satisfacer las necesidades de los clientes.

Hay ejemplos de aplicación del modelo de descubrimiento del cliente empleando fuentes diferentes a las entrevistas directas, como el caso descrito en Marlina, Fahmi y Satria (2018), en el que se utilizaron tres fuentes de información: 1) observaciones, 2) entrevistas y 3) cuestionarios, para determinar las características de los clientes de un nuevo fertilizante de bajo impacto ambiental.

Algunos investigadores, como Mooi, Osinga y Santos (2022), han documentado los factores clave en el proceso de consideración de actores externos, como clientes, competidores y proveedores en el desarrollo de nuevos productos.

La realización de estudios de mercado empleando medios digitales es una práctica que se ha incrementado en los últimos años. Wang (2022) describe un análisis de la efectividad de los análisis de mercado vía Internet para realizar innovación en servicios. Wang (2022) desarrolló un modelo de regresión para correlacionar variables asociadas con la participación de los clientes y el desempeño de la innovación. Las variables de la participación del cliente identificadas fueron las siguientes: a) compartición de información, b) comportamiento cooperativo, c) interacción interpersonal. Las variables del desempeño de la innovación identificadas fueron a) desempeño del proceso de la innovación de servicios y b) desempeño del resultado de la innovación de servicios. De acuerdo con los autores, en Wang (2022) existe una buena correlación entre estos dos conjuntos de variables.

Existen modelos cuantitativos que intentan medir el grado de correspondencia entre la satisfacción de los requerimientos del cliente y los atributos del producto actual, como un mecanismo propuesto por Geng, Shi, Zu, Chai y Xing (2021) para realizar el proceso de innovación incremental. Las conclusiones planteadas en este trabajo indican que un modelo de determinación de necesidades basado en un conjunto de clientes, así como un grupo de expertos, puede ser efectivo para el proceso de innovación incremental.

La recuperación de información de usuarios se puede efectuar mediante las grandes bases de datos de las redes sociales, tal como lo expresan Liu, Cheng y Zhao (2018), para tener ventaja de grandes cantidades de datos para su correspondiente análisis.

Perfil del CIATEQ

CIATEQ A. C. (CIATEQ, 2022), Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro, es una institución dedicada al desarrollo de soluciones tecnológicas para sectores industriales y sociales, que atiende principalmente tres ejes estratégicos en materia de energía, agua y salud, Los proyectos están encaminados a generar innovación y fortalecer la investigación aplicada, que contribuyan a la formación del capital humano y cumplan las necesidades demandantes que requiere el país.

CIATEQ (2022) pertenece a la Red de Centros Públicos de Investigación del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt), y forma parte de la Coordinación de Materiales, Manufactura Avanzada y Procesos Industriales.

El Centro de tecnología Avanzada (CIATEQ, 2022) tiene presencia en siete estados del país: Querétaro, Aguascalientes, Lerma Estado de México, Hidalgo, Jalisco, San Luis Potosí y Tabasco; cuenta con capacidades en instalaciones equipadas con *software* para ingeniería asistido por computadora, talleres de fabricación y maquinado, equipos de medición y laboratorios de servicio certificados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), así como infraestructura de alto nivel competitivo que facilita la interacción multidisciplinaria para la realización de los proyectos, que aseguran el cumplimiento de los requerimientos y expectativas de los clientes.

Los proyectos de desarrollo tecnológico del Centro se orientan a la solución de demandas sociales e industriales de tecnología en los apartados de energía, agua y salud.

Una de las vertientes de interés para el Centro, relativas al sector agua, se refiere al reciclado de aguas grises.

Reciclado de aguas grises

Como resultado de ejercicios previos de planeación tecnológica en CIATEQ, se determina que una de las problemáticas principales de México es la escasez de agua, al ser uno de los 25 países con mayor estrés por agua en el mundo, tal como se refiere en el World Resources Institute (WRI, 2023). En el compendio preparado por Jefferson, Laine, Parsons, Stephenson y Judd (1999) se hace referencia a la situación en Inglaterra, hace más de veinte años, y se reseñan sistemas de uso del agua de lluvia para excusados que datan de la época del rey Minos de Creta hace 5 000 años. Las aguas grises son producto del uso de jabón o productos

jabonosos de la ducha o lavabo, o lavado de ropa. En este trabajo se presentan tres sistemas de filtrado:

1. Filtración gruesa y desinfección básica, que otorgan de 3.4 a 33.4 % de recuperación de agua.
2. Sistemas físicos y fisicoquímicos, en particular sistemas de membranas, significativamente más efectivos, aunque más consumidores de energía para su operación.
3. Biológicos, en particular biorreactores de membrana (MBR) y filtros biológicamente aerados (BAF). Estos sistemas, por lo general, complementan los dos sistemas previos y otorgan un incremento en la remoción de organismos coliformes y turbidez.

Paulo, Azevedo, Begosso, Galbiati y Boncz (2013) hacen referencia a los humedales artificiales, los cuales se consideran una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas grises y que cuentan con las siguientes ventajas:

- Simplicidad técnica
- Alta capacidad de tratamiento
- Buen índice de eliminación bacterial
- Alta flexibilidad de carga
- Mínimo consumo de energía

Paulo *et al.* (2013) despliegan la propuesta de un sistema de tratamiento de aguas negras basado en el mismo principio de humedales artificiales, que a partir del diseño propuesto cumple de modo eficaz el propósito de filtrado. Si bien las aguas negras no son la temática principal del presente trabajo, los autores consideran que este método de

tratamiento de agua puede aplicarse también a las aguas grises bajo ciertas consideraciones no abordadas en el presente estudio.

De especial importancia resultan las investigaciones de aplicación de sistemas de tratamiento de aguas grises en países menos desarrollados, por ser comparables con la situación de México. Leas, Dare y Al-Delaimy (2013) abordan el impacto de la aplicación de sistemas de tratamiento de aguas grises en países de Medio Oriente y el norte de África.

Leas *et al.* (2013) describen el caso de la implementación del tratamiento de aguas grises en comunidades pobres de países que forman parte de MENA (Medio Oriente y el norte de África). El reporte indica que 35.7 % de las aguas residuales de la región se trata, por lo que existe un gran potencial de tratamiento de aguas residuales. También en este trabajo se identifican desventajas en aspectos como salud e impacto ambiental negativo.

Las aguas grises pueden emplearse para diversos propósitos, como el riego para ciertos cultivos, como lo constatan Rangel-de-Souza-Melo *et al.* (2020), quienes plantean un análisis de los efectos de riego con aguas grises para el cultivo de girasoles. El resultado en este estudio muestra que la calidad de las aguas grises tratadas, diluidas en un 55 % con agua potable, es aceptable para lograr el crecimiento adecuado de los cultivos estudiados.

Propósito

Las iniciativas de desarrollo tecnológico en el CIATEQ son presentadas por los grupos de investigación y desarrollo a la alta dirección y se aceptan sobre las bases usuales de estrategia y disponibilidad de recursos, entre otros factores. Un dispositivo doméstico de reciclado de aguas grises invita a consultar a potenciales usuarios sobre su probable aceptación. Los estudios de mercado de electrodomésticos implican tiempo y recursos financieros.

El presente trabajo de investigación tiene como propósito presentar el modelo de exploración preliminar ágil de usuarios y mercado potencial de inversionistas para una solución tecnológica relacionada con el reciclado de aguas grises a nivel doméstico, que ha sido propuesta para desarrollarse en CIATEQ.

Las hipótesis planteadas en el estudio son:

H1: la realización de un estudio que determine el grado de interés de una muestra de usuarios potenciales acerca de una solución tecnológica será útil para identificar la factibilidad de continuar tanto con análisis más exhaustivos de usuarios como con el desarrollo tecnológico o reorientar el concepto originalmente propuesto.

H2: llevar a cabo un estudio que determine el grado de interés de empresarios en adquirir el paquete tecnológico asociado con la producción de un dispositivo de reciclado del agua será eficaz para enfocar y orientar estudios más profundos de identificación de posibles clientes de la tecnología propuesta.

Para efectos de este estudio, se determina que el usuario es la persona que utiliza o aplica un producto que incorpora las tecnologías bajo estudio; mientras que el cliente tecnológico o simplemente cliente, el inversionista que puede adquirir la tecnología mediante un proceso de transferencia para reproducirla en su empresa.

Materiales y métodos

La metodología de investigación propuesta (Figura 1) consiste en un sondeo ágil para conocer la percepción de usuarios potenciales de una tecnología determinada, así como el grado de interés de empresarios fabricantes de equipos electrodomésticos en dicha tecnología.

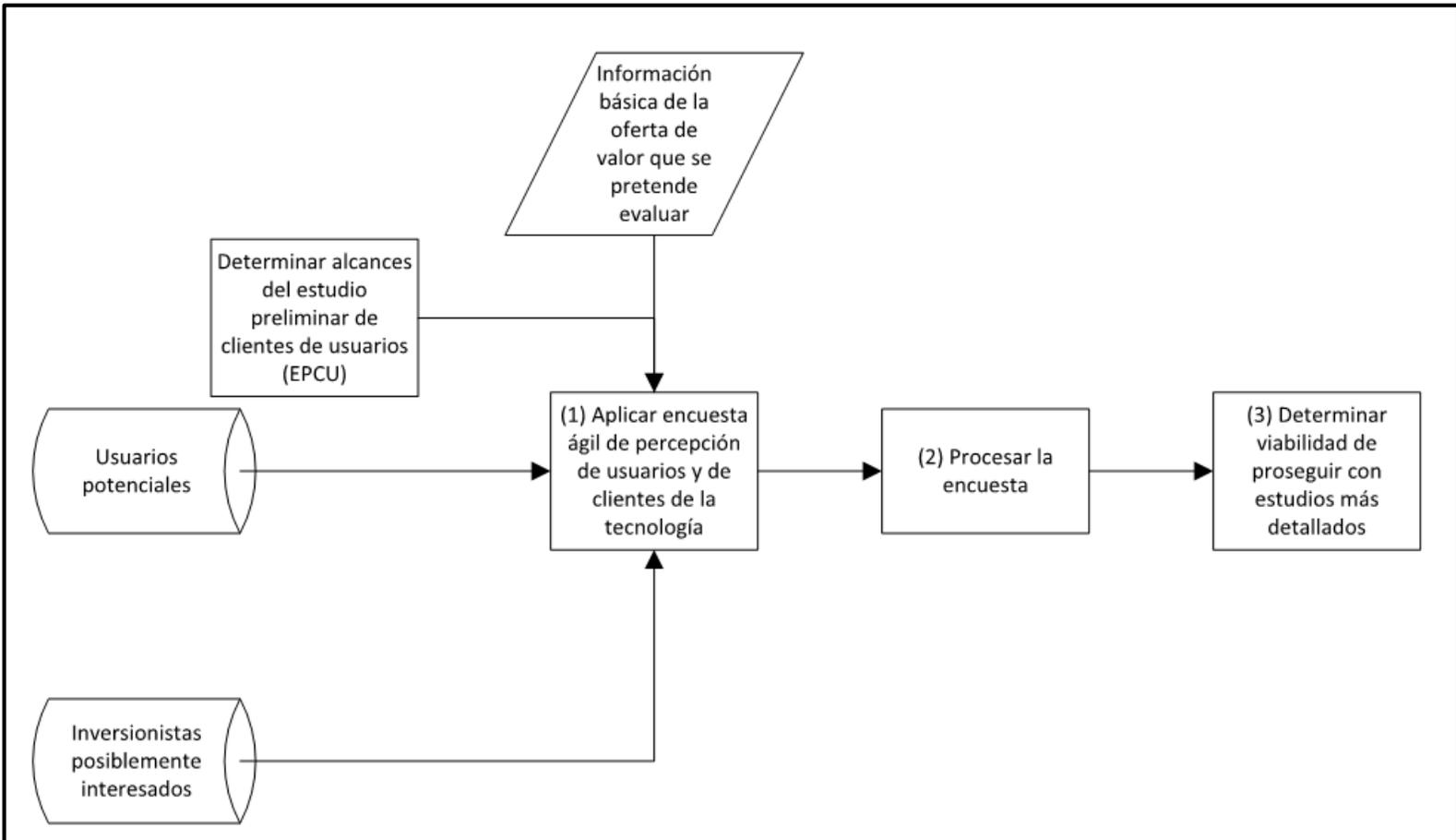


Figura 1. Metodología propuesta del prediagnóstico de percepción de clientes (modelo original de los autores).

Aplicación de encuestas (1)

Los datos se recopilaron a través de la aplicación de dos encuestas en línea: DIAG-USUARIO y DIAG-CLIENTE. La primera encuesta, DIAG-USUARIO, se hizo a posibles usuarios de la tecnología propuesta para reciclado de aguas grises. La segunda encuesta, DIAG-CLIENTE, se formuló para empresas que se dedican al diseño y manufactura de

electrodomésticos, y que potencialmente estarían interesados en adquirir el activo tecnológico para producirlo de forma masiva.

Se aplicó la primera encuesta DIAG-USUARIO a colaboradores CIATEQ, lo que arrojó un total de 132 encuestas respondidas de un total de 430 colaboradores.

Es posible afirmar que esta encuesta abordó una muestra representativa de la población de CIATEQ, toda vez que se aplicó el instrumento al total de colaboradores, de los cuales se obtuvieron 132 respuestas. En general, el perfil de los encuestados es categorizado como empleados del sector terciario de Gobierno (INEGI, s.f.). Esta clase de muestreo se denomina como "deliberado no aleatorio" (Kiran, 2019), pues es un muestreo no probabilístico basado en la facilidad de acceso. Se estimó un tiempo consecución de los resultados de aproximadamente dos semanas.

La segunda encuesta DIAG-CLIENTE se aplicó a una lista de distribución proporcionada por la Asociación Mexicana de Directivos en Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico (ADIAT). De esta última encuesta, se recibieron 12 respuestas. El número total de registros de la base de datos se desconoce, al ser un dato confidencial de ADIAT. Nuevamente el muestro es deliberado no aleatorio (Kiran, 2019). El tiempo de respuesta de empresarios fue de una semana. Se acepta que no es una muestra representativa de empresas dedicadas a electrodomésticos.

En ambos casos, se trata de un muestreo no probabilístico, toda vez que el propósito del estudio es contar con una imagen preliminar de la

percepción de la tecnología por parte de estos sectores clave: usuarios y posibles inversionistas en la tecnología.

Procesamiento de la encuesta

Se utilizó la plataforma MS Forms de Microsoft para diseñar las encuestas.

Se empleó la plataforma Power BI de Microsoft para procesar los datos.

Determinar la viabilidad de proseguir con estudio más detallados

A partir de los resultados obtenidos, se determinó la viabilidad para proseguir con análisis de mercado más detallados.

Encuesta de percepción del cliente (DIAG-USUARIO)

Se aplicó una encuesta de percepción del cliente a 132 usuarios (hombres y mujeres) tanto colaboradores de CIATEQ como público en general, con el propósito de entender las necesidades de una muestra de la población respecto del reciclado de aguas grises en las viviendas. La encuesta se muestra en Anexo 1.

Encuesta de interés en invertir en tecnologías de reciclado de aguas grises por parte de empresas y otras organizaciones (DIAG-CLIENTE)

Esta encuesta tiene el propósito de identificar el grado de interés por la innovación disruptiva en la industria de electrodomésticos en México, específicamente relativo a un dispositivo doméstico de reciclado de aguas grises. Se aplicó a 12 empresarios o representantes de organizaciones. La encuesta se muestra en el Anexo 2.

Resultados

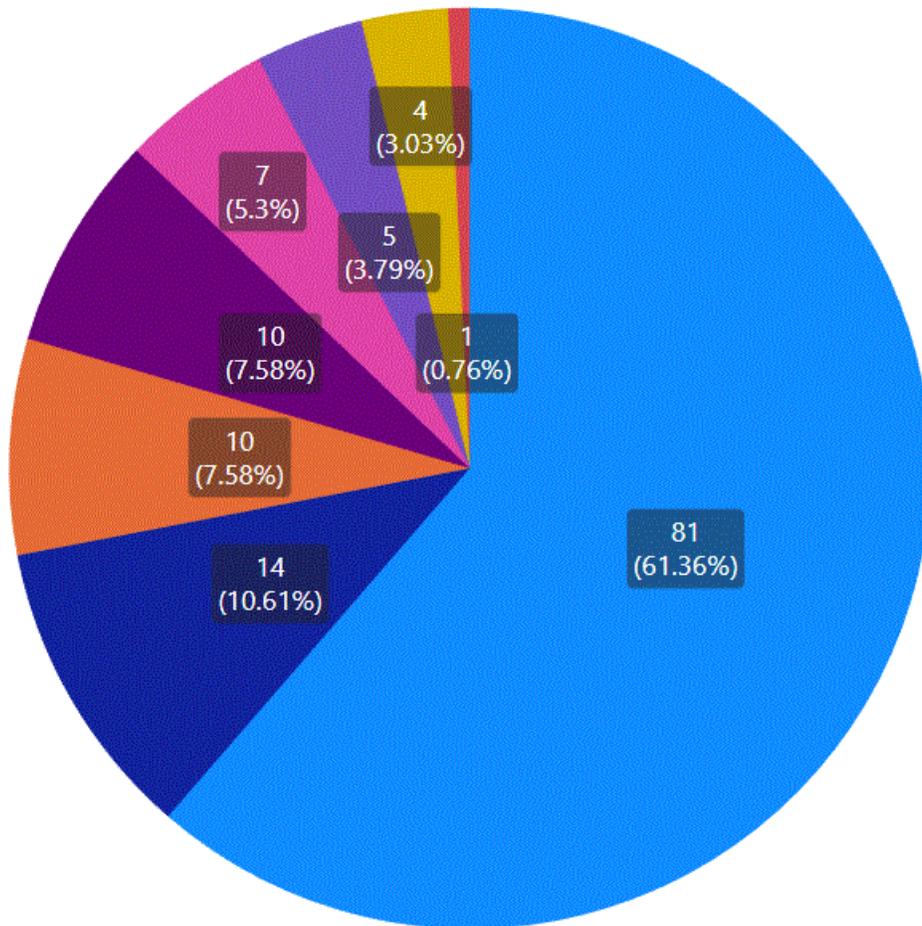
Encuesta de usuarios potenciales

El perfil de los encuestados es relativamente homogéneo, pues se trata de colaboradores del CIATEQ. Las variables seleccionadas se refieren a los patrones de uso de agua para el lavado de prendas de ropa y la disposición correspondiente del agua residual para posterior uso. El perfil de los respondientes se asocia con el sector de empleados formales de empresas industriales en la ciudad de Querétaro, México. Se hizo un análisis de las encuestas, del cual se derivan las siguientes conclusiones:

1. La mayoría de los encuestados vive en Querétaro (61.36 %) (Figura 2).
2. La mayoría de los encuestados vive en una casa independiente (85.61 %) (Figura 3).
3. La mayoría de los encuestados cuenta con lavadora (93.94 %) (Figura 4).

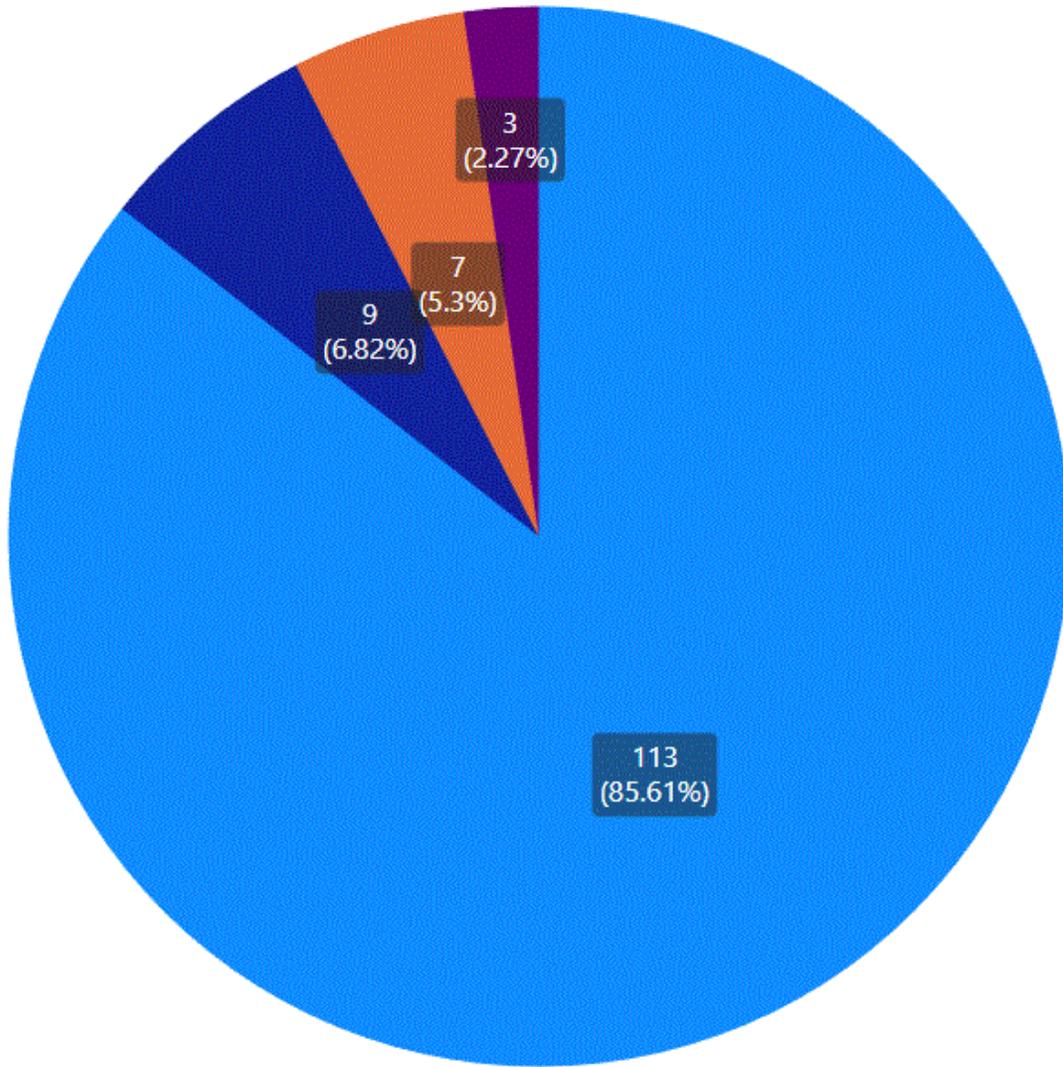
4. La mayoría de los encuestados **no** cuenta con centro de lavado (74.19 %) (Figura 5).
5. La mayoría de los encuestados **no** cuenta con dispositivos de ahorro de agua (79.55 %) (Figura 6).
6. La mayoría de los encuestados mostró interés en contar con un sistema de reciclado de agua gris (93.18 %) (Figura 7).
7. Un porcentaje de encuestados pagaría entre 500 y 1 000 pesos por un dispositivo de ahorro de agua (41.67 %) (Figura 8).
8. Un porcentaje de encuestados pagaría entre 1 000 y 3 000 pesos por un dispositivo de reciclado de aguas grises (35.61 %) (Figura 9).

Así, se concluye a partir de los resultados de esta encuesta muestral, que un dispositivo de reciclado de aguas grises es de interés para una fracción significativa del grupo de colaboradores encuestado.



Estado de la República ● Querétaro ● México ● Aguascalientes ● Tabasco ● San Luis Potosí ● Hidalgo ● Jalisco ● Quintana Roo

Figura 2. Estado de la república de los encuestados.



Tipo de vivienda ● Casa independiente ● Departamento en edificio ● Cuarto en casa ● Cuarto en departamento

Figura 3. Tipo de vivienda.

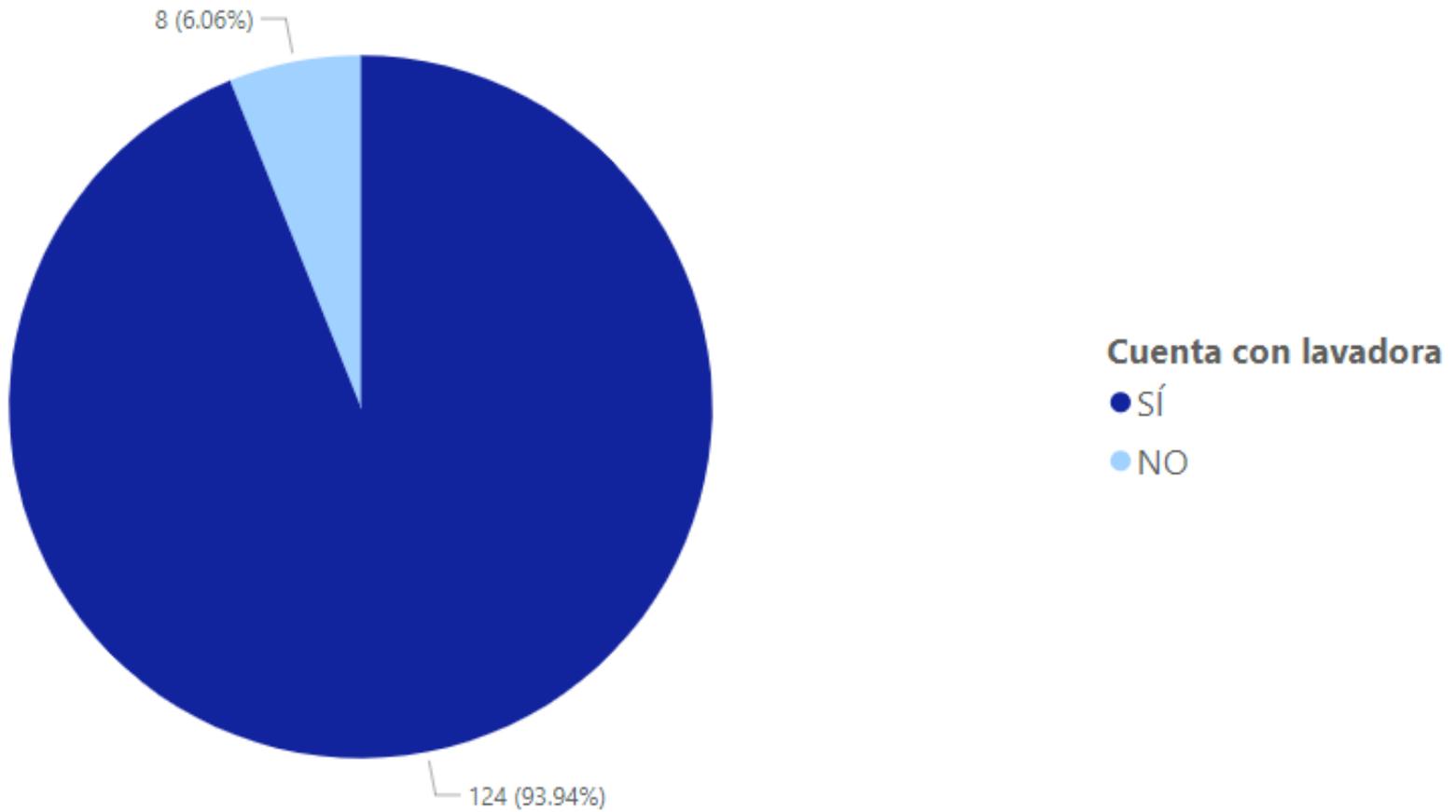
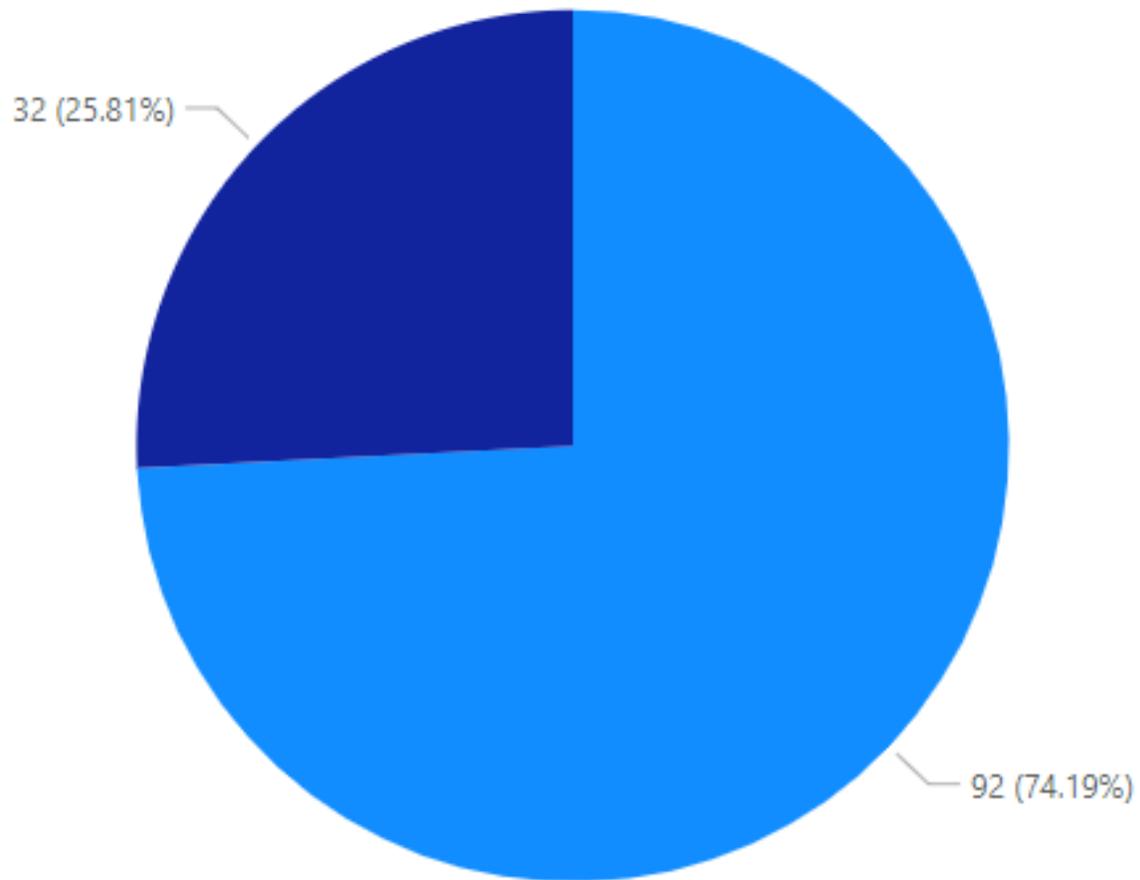
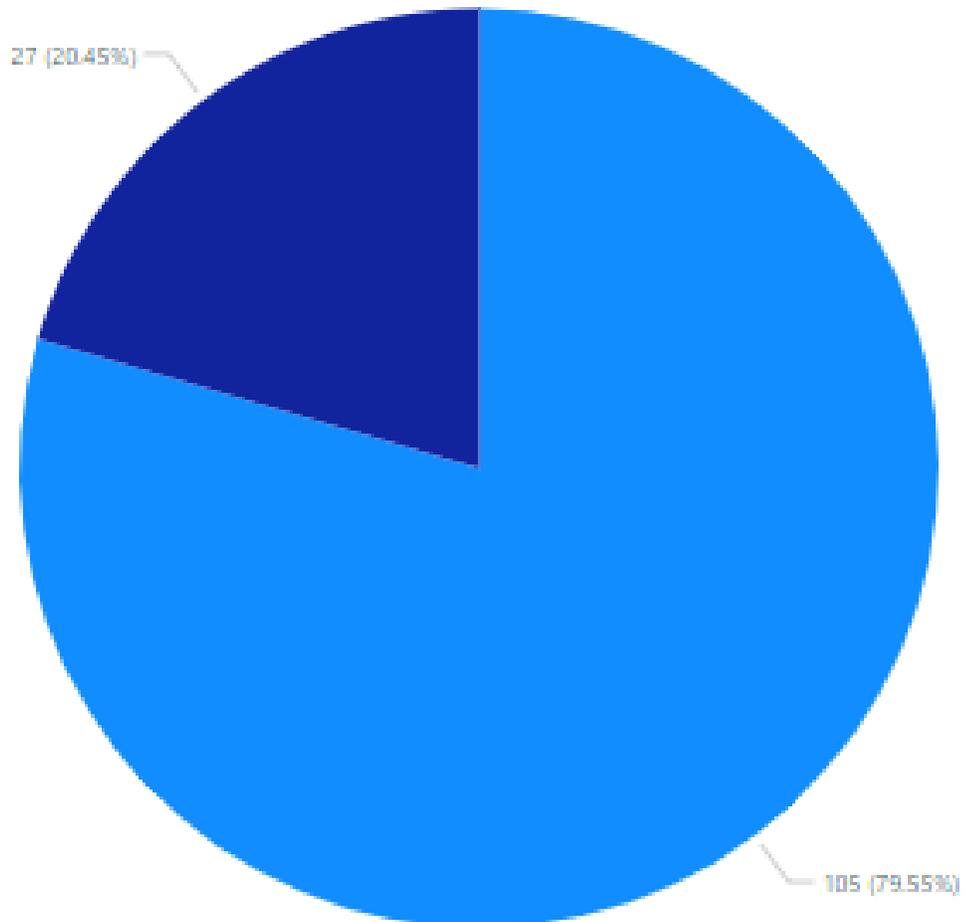


Figura 4. Cuenta con lavadora.



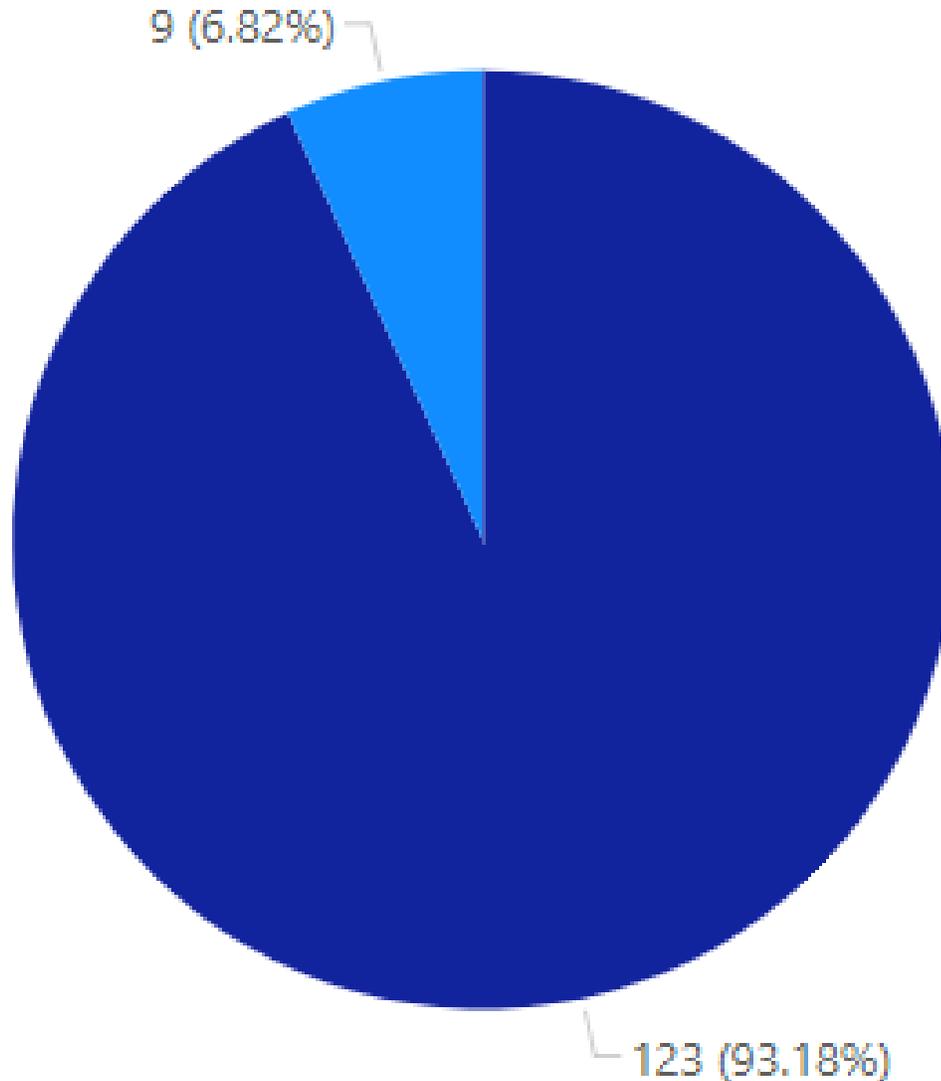
Centro de lavado? ● NO ● SÍ

Figura 5. Cuenta con centro de lavado.



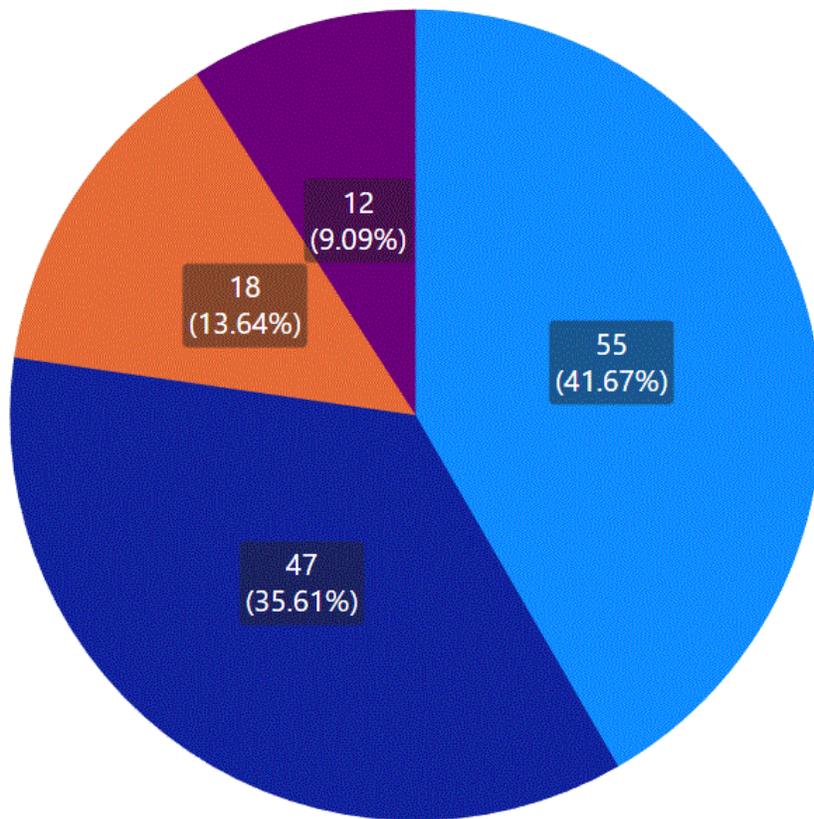
Dispositivos para ahorrar agua? ● NO ● SÍ

Figura 6. Su casa cuenta con dispositivos ahorradores.



Te interesaría un reciclador de agua? ● Sí ● No

Figura 7. Te interesaría contar con un nuevo dispositivo de reciclado de aguas grises.



Cuánto estaría Usted dispuesto a pagar? ● Entre 500 y 1,000 pesos ● Entre 1,000 y 3,000 pesos ● Menos de 500 pesos ● Más de 3,000 pesos

Figura 8. Precio que está dispuesto a pagar el encuestado/a por un dispositivo de reciclado de aguas grises domésticas.

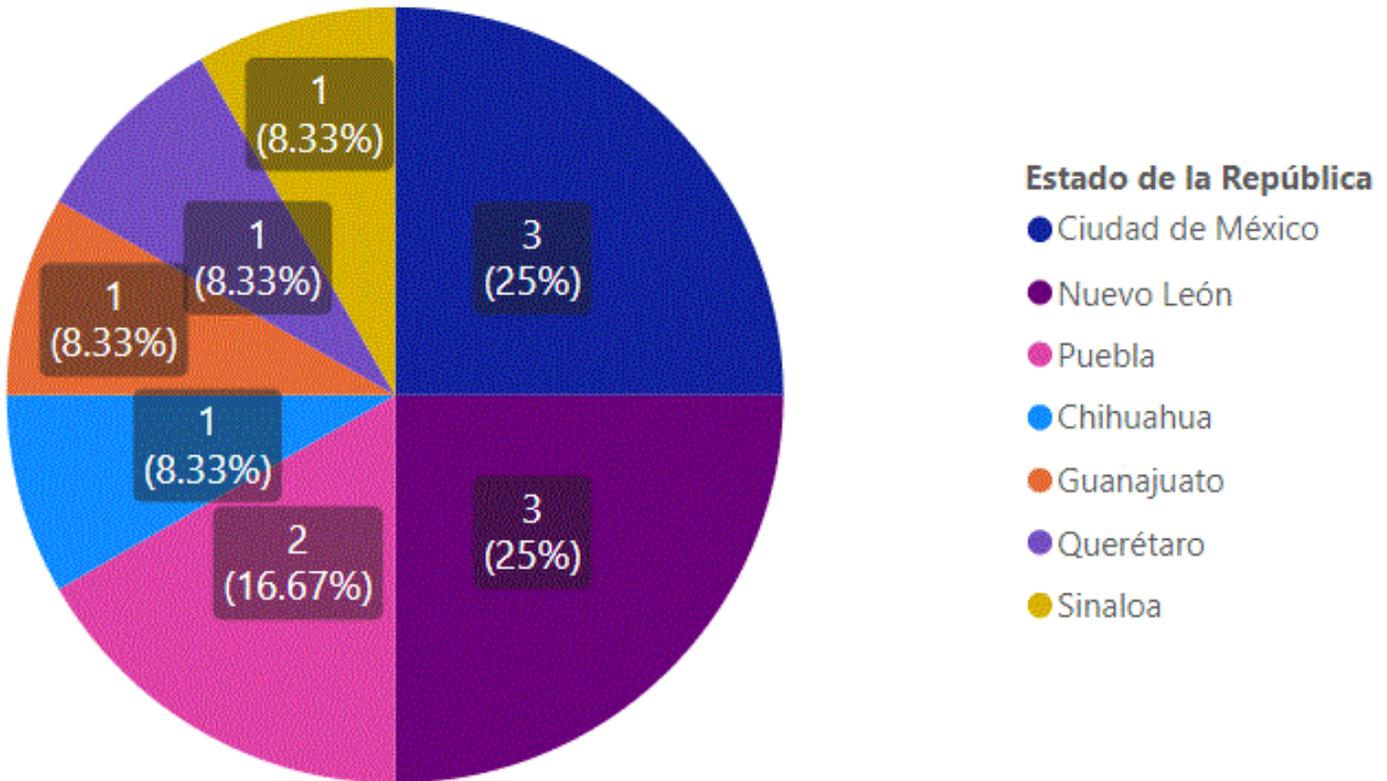
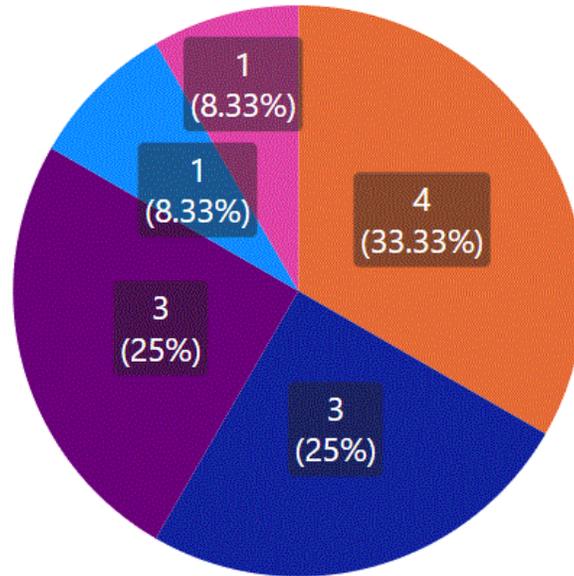


Figura 9. Estados de la república de los empresarios encuestados.

Resultados de posibles inversionistas

1. La mayoría de los empresarios encuestados es de Ciudad de México (25 %) y Nuevo León (25 %) (Figura 9).
2. La mayoría de los empresarios encuestados mostró interés en invertir en una tecnología de reciclado de aguas grises (58.33 %) (Figura 10).



Interés en invertir en reciclado de agua ● Muy interesado ● Interesado ● Muy poco interesado ● Extremadamente interesado ● Poco interesado

Figura 10. Interés en invertir en una tecnología de reciclado de aguas grises.

Discusión

El propósito de este estudio fue demostrar que la realización de una exploración ágil de la percepción de los clientes y usuarios potenciales para determinar la concordancia entre una solución tecnológica y las necesidades específicas de usuarios domésticos nos daría pautas para acciones subsecuentes tanto de desarrollo tecnológico como de análisis detallados de mercado.

En el análisis presentado en este artículo, la percepción de los clientes respecto de un dispositivo de reciclado de aguas grises (DIRAG)

es positiva y hay indicios de que dicha solución tendría un mercado de cierto valor.

La Figura 7 muestra que un 93.18 % de los encuestados estaría dispuesto a evaluar la adquisición de un dispositivo de reciclado de aguas grises. Dicho resultado muestra una cierta sensibilidad hacia la adquisición de dispositivos que promuevan el ahorro del agua. El factor precio es importante, por lo que se consultó el rango de precios aceptable para un dispositivo de reciclado de aguas grises (DIRAG). La Figura 8 muestra que los usuarios que estarían dispuestos a pagar entre 1 000 y 3 000 pesos por dicho equipo es de 35.61 %.

Es pertinente considerar el gasto promedio mensual de una familia por concepto de suministro de agua. Lo anterior, porque la referencia comparativa de la compra de un equipo de reciclado de agua probablemente sea el ahorro en el consumo y consiguiente gasto económico por dicho concepto. En Querétaro, el consumo de una familia de cuatro personas es de alrededor de 20 m³, presentada por Palencia (2022). El correspondiente monto económico es de \$540.00 pesos mensuales, considerando la tarifa doméstica económica publicada por la Comisión Estatal de Aguas Querétaro (CEA-Querétaro, 2022). De esta forma, si se logra ahorrar agua a través del nuevo dispositivo DIRAG en un porcentaje de 20 %, la inversión de 3 000 pesos se recuperaría en poco más de dos años.

De acuerdo con Arbon e Ireland (2003), existen varios criterios que se deben considerar en la gestión de agua reciclada a nivel municipal para su reutilización en las comunidades. Entre dichos factores se encuentran los siguientes: 1) obtener apoyos económicos por parte de inversionistas y/o de gobierno; 2) establecer mercados garantizados a largo plazo para

el agua reciclada; 3) implementar esquemas de reciclaje a gran escala bien planificados; 4) e implementación de un sistema que sea económicamente viable.

Otros autores, como Geng *et al.* (2021), han aplicado técnicas de sondeo de la compaginación entre los requerimientos del cliente y las consideraciones para innovación incremental de productos. En el presente trabajo, el estudio indagó el interés del usuario por reciclar aguas grises y también atributos importantes, como el precio que estaría dispuesto a pagar el usuario por un dispositivo (DIRAG).

De manera complementaria, la percepción de empresarios/representantes de organizaciones referente a implementar una tecnología de reciclado de aguas grises es positiva; 7 de los 12 representantes de organizaciones estarían interesados en recibir información de un dispositivo de reciclado de aguas grises domésticas.

Esta investigación planteó retos importantes para la consecución de los datos tanto de usuarios como de los clientes de la tecnología. Por la naturaleza del dispositivo DIRAG, al tratarse de un producto doméstico, se consideró adecuado lanzar la encuesta de sondeo de usuarios en el propio CIATEQ. Con respecto a la investigación ágil del grado de interés en empresas fabricantes de electrodomésticos, se solicitó apoyo a la Asociación Mexicana de Directivos de la Investigación Aplicada y el Desarrollo Tecnológico (ADIAT) para enviar la encuesta a una muestra pertinente de sus afiliados. En general, el proceso de consecución de datos fue ágil. Se espera que en subsecuentes ejercicios el proceso se realice aún con más rapidez, lo cual finalmente es un atributo esencial del modelo propuesto.

Conclusiones

El presente estudio desplegó un modelo de aplicación ágil para determinar el interés de usuarios potenciales de una nueva solución tecnológica, así como de posibles inversionistas en la tecnología.

Es posible comprobar la validez de las hipótesis planteadas en el presente estudio a través del siguiente análisis:

H1: la realización de un estudio que determine el grado de interés de una muestra de usuarios potenciales acerca de una solución tecnológica será útil para identificar la factibilidad de continuar tanto con análisis más exhaustivos de usuarios como con el desarrollo tecnológico o reorientar el concepto originalmente propuesto.

Validación: efectivamente, el estudio fue útil para estimar el grado de aceptación de la solución tecnológica de manera preliminar. De haber encontrado mínima aceptación de la solución tecnológica, sería un indicador a tomar en cuenta para reconsiderar el planteamiento original de la tecnología propuesta.

H2: llevar a cabo un estudio que determine el grado de interés de empresarios en adquirir el paquete tecnológico relacionado con la producción de un dispositivo de reciclado del agua será eficaz para enfocar y orientar estudios más profundos de identificación de posibles clientes de la tecnología propuesta.

Validación: el estudio arrojó información importante sobre la percepción de posibles inversionistas sobre la tecnología. Si bien la muestra identificada fue reducida, el hecho de enfrentar de manera

directa la oferta de valor, efectivamente proporciona indicios de la posible aceptación del activo tecnológico.

En este caso, se sugiere efectuar estudios de clientes y mercado más detallados, toda vez que la exploración ágil resultó positiva o prometedora.

Los resultados de la aplicación del modelo pueden ser de gran valor para CIATEQ y en general para los centros de desarrollo tecnológico (CDT), ya que permiten contar con información oportuna para decidir sobre la asignación de tiempo, recursos humanos y fondos en la realización de actividades de investigación de mercado y de sondeo de posibles inversionistas. De esta forma se optimizan los recursos asignados a estos procesos de investigación y desarrollo. Se enfatiza el hecho de que se aplicaron métodos no probabilísticos de sondeo precisamente porque se trata de un diagnóstico preliminar que servirá de fundamento para invertir en muestreos formales en caso de justificarse el avance en el desarrollo tecnológico.

Hoy en día existen problemas sociales importantes que impactan en la economía de las familias. El problema de la disponibilidad del agua es de crítica relevancia tanto los ámbitos nacional como mundial, como se muestra en el reporte de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2015). Existen numerosas soluciones que tratan de solventar los temas de escasez y desperdicio de agua. El presente trabajo aborda la percepción de los usuarios al respecto de una tecnología concreta de reciclado de aguas grises, que puede ser preámbulo para evaluar la percepción de usuarios y clientes de otras soluciones relacionadas con la gestión del agua.

La pertinencia de soluciones tecnológicas que puedan cubrir las necesidades apremiantes de la población fue el principal foco de estudio de esta investigación. Por último, es posible sugerir la aplicación del modelo EXAPEREC en otros ejercicios que involucren la evaluación preliminar de propuestas de productos tecnológicos del portafolio de innovaciones tanto de CIATEQ como de otros equipos de desarrollo tecnológico en centros públicos o privados de investigación, desarrollo e innovación.

Agradecimientos

Agradecemos la autorización para realizar esta investigación a la Dirección General y la Dirección de Gestión Institucional del Centro CIATEQ, A. C. Agradecemos también a los colaboradores de CIATEQ, A. C. que participaron en la encuesta de opinión, y finalmente al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, nuestra cabeza de sector, por apoyar en general todos los trabajos de investigación en CIATEQ, A. C.

Anexo 1

A. Tipo de vivienda:

- a) Casa independiente
- b) Departamento en edificio
- c) Cuarto en casa
- d) Cuarto en departamento

- B. ¿Cuenta con lavadora?
- a) Sí
 - b) No
- C. ¿Cuenta con centro de lavado (secadora y lavadora)?
- a) Sí
 - b) No
- D. ¿Su casa cuenta con dispositivos de ahorro/recuperación de agua?
- a) Sí
 - b) No
- E. ¿Qué dispositivos emplea para ahorro de agua?
- a) Respuesta libre
- F. ¿Te interesaría contar con un nuevo dispositivo de reciclado de aguas grises?
- a) Sí
 - b) No
- G. ¿Cuánto estaría usted dispuesto a pagar por un dispositivo de reciclado/ahorro de agua?
- a) Menos de 500 pesos
 - b) Entre 500 y 1 000 pesos
 - c) Entre 1 000 y 3 000 pesos
 - d) Más de 3 000 pesos

- H. Comentarios adicionales. Por favor escriba ideas o comentarios sobre tecnologías domésticas para ahorro y reciclado del agua que quisiera compartir.
- a) Respuesta libre

Anexo 2

- A. ¿La empresa cuenta con la función de innovación/ desarrollo de nuevos productos o equivalente?
- a) Sí
- b) No
- B. Perfil de desarrollo tecnológico
- a) Lanzamiento de nuevos productos en corto o mediano plazo
- b) Fabricación de productos sustentables
- c) Inversión en nuevas tecnologías de producto
- C. Tecnología de reciclado de agua gris
- a) Interés en invertir en una tecnología de reciclado de agua gris proveniente de la lavadora
- D. ¿Estaría interesado en recibir más información acerca de nuestras tecnologías de reciclado de aguas grises para uso doméstico?
- a) Sí
- b) No

E. Por favor escriba comentarios adicionales que considere convenientes, con gusto los tomaremos en cuenta:

a) Respuesta libre

Referencias

Arbon, M., & Ireland, M. (2003). Water recycling: A major new initiative for Melbourne – Crucial for a sustainable future. *Water science and technology: A journal of the International Association on Water Pollution Research*, 47(7-8), 57-63.

Batova, T., Clark, D., & Card, D. (2016). *Challenges of lean customer discocery as invention*. 2016 IEEE International Professional Communication Conference (IPCC), Austin, Texas, USA. DOI: 10.1109/IPCC.2016.7740514

CEA-Querétaro, Comisión Estatal de Aguas Querétaro. (12 de octubre, 2022). *CEA Querétaro*. Recuperado de <https://www.ceaqueretaro.gob.mx/tarifario/>

CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzada. (1 de septiembre, 2022). *CIATEQ*. Recuperado de www.ciateq.mx

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (1 de enero, 2015). *Conagua*. Recuperado de https://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/carrera_agua_2015.pdf

- Geng, L., Shi, X., Zu, L., Chai, M., & Xing, J. (2021). Importance calculation of customer requirements for incremental product innovation. *Frontiers in Psychology*, 12, 18. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.633472
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s.f.). *Productividad sectorial*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/productividadsec/>
- Jefferson, B., Laine, A., Parsons, S., Stephenson, T., & Judd, S. (1999). Technologies for domestic wastewater recycling. *Urban Water*, 1(4), 285-292.
- Kiran, D. R. (2019). *Production planning and control - A comprehensive approach - 9.6.8 factors that influence the sample size*. Oxford, Reino Unido: Elsevier.
- Leas, E., Dare, A., & Al-Delaimy, W. (2013). Is gray water the key to unlocking water for resource-poor areas of the Middle East, North Africa, and other arid regions of the world? *Ambio*, 43(6):707-17. DOI: 10.1007/s13280-013-0462-y
- Liu, Y., Cheng, P., & Zhao, D. (2018). New product launch actions and firm performance: The effects of breadth, complexity and heterogeneity. *Chinese Management Studies*, 12(2), 310-317. DOI: 10.1108/CMS-06-2017-0156
- Marlina, Y., Fahmi, I., & Satria, A. A. (2018). Customer discovery of biofertilizer business. *Journal of Management and Agriculture*, 15(2), 107-117. DOI: 10.17358/jma.15.2.107

Mooi, E., Osinga, E. C., & Santos, C. D. (2022). Collaboration scope and product innovation in B2B markets. *European Journal of Marketing*, 899-921. Recuperado de https://ink.library.smu.edu.sg/lkcsb_research/6983

Palencia, Ó. D. (22 de octubre, 2022). *Órganos de Palencia*. Recuperado de <https://organosdepalencia.com/biblioteca/articulo/read/228499-cuantos-metros-cubicos-de-agua-consume-una-familia-de-4-personas>

Paulo, P. L., Azevedo, C., & Begosso, L., Galbiati, A. F., & Boncz, M. A. (2013). Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecological Engineering*, 50, 95-100. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.03.022

Rangel-de-Souza-Melo, M., Da-Silva-Dias, N., Igor-José, N., Dantas-Travassos, K., De-Oliveira-Miranda, N., Tavares-Gurgel, M., De-Souza-Lemos-Neto, H., & Dos-Santos-Fernandes, C. (2020). Strategies for applying gray water effluent on ornamental sunflower crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(31), 537-544. DOI: 10.1007/s11356-020-09200-6

Schweitzer, F., Van-den-Hende, E. A., & Hultink, E.-J. (2020). There's more than one perspective to take into account for successful customer integration into radical new product innovation. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(3), 813-829. DOI: 10.1109/TEM.2019.2893060

- Thamjamrassri, P., Song, Y., Tak, J., Kang, H. Y., Kong, H.-J., & Hong, J. (2018). Customer discovery as the first essential step for successful health information technology system development. *Healthcare Informatics Research*, 24(1), 79-85.
- Trappey, A. J. C., Trappey, C. V., Fan, C.-Y., & Lee, I. J. Y. (2018). Consumer driven product technology function deployment using social media and patent mining. *Advanced Engineering Informatics*, 36, 120-129. DOI: 10.1016/j.aei.2018.03.004
- Wang, J. (2022). Research on the Impact of Customer Participation in Virtual Community on Service Innovation Performance- The Role of Knowledge Transfer. *Frontiers in Psychology*, 13, 1-12. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.847713
- WRI, World Resources Institute. (16 de agosto, 2023). *WRI*. Recuperado de <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>
- York, J. L., & Danes, J. E. (2014). Customer development, innovation and decision making biases in the lean start up. *Journal of small business strategy*, 24(2), 21-39. Recuperado de <https://libjournals.mtsu.edu/index.php/jsbs/article/view/191>

Análisis geoespacial de los sitios de afectación por inundación desde una base de datos recopilada por el cuerpo de bomberos de Guadalajara durante el temporal de lluvia del periodo 2010-2022

Geospatial analysis of flood impact sites from a database compiled by the Guadalajara fire department during the rainy season of the 2010-2022 period

Maura González¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-2831>

Boris Comi², ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7964-9500>

Jesús López De la Cruz³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8230-6414>

¹Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Unidad CEIBAAS (Centro de Estudios e Investigación en Biocultura, Agroecología, Ambiente y Salud), Colima, México / Programa Investigadoras e Investigadores por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, México / Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Civil, Colima, México, maura.gonzalez@ciad.mx

²Coordinación Municipal de Protección Civil de Guadalajara, Guadalajara, México, bcomi@guadalajara.gob.mx

³Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Civil, Colima, México,
jlopez71@ucol.mx

Autora para correspondencia: Maura González, maura.gonzalez@ciad.mx

Resumen

Se analizan los sitios de afectación por inundación (SAI) atendidos por la Coordinación de Protección Civil de Guadalajara (CMPCG) desde un enfoque geoespacial; se da a conocer la distribución de cómo, cuándo y dónde han afectado las inundaciones durante los últimos 12 años (2010-2022). El caso de estudio es la zona urbana del municipio de Guadalajara; se analiza la frecuencia, distribución e intensidad de las inundaciones año por año, y del total del periodo de estudio. Se obtuvo un mapa de categorización del tirante de agua, considerando la altura de nivel de inundación histórica presentada por colonias, donde la mayoría presenta un rango que va de medio a bajo. Posteriormente, se analizaron los servicios atendidos por bases del área operativa de la CMPCG, donde los mayores sectores afectados son la vía pública y el sector casa habitación. Se trabajó con un total de 3 676 SAI contenidos en el inventario de inundaciones de la CMPCG. El estudio permite identificar 63 sitios recurrentes de inundación (SiRI) con la información de los SAI. A escala de colonias, se corresponden a 65 colonias recurrentes de inundación (CRI). Se exhiben, además, 20 sitios críticos de inundación (SiCI), que cumplieron con los criterios de recurrencia, también se considera el criterio de incidencia tanto en el campo de domicilio como en el de cruce. Finalmente, se destaca la labor que se realiza día con día en la

Coordinación Municipal de Protección Civil de Guadalajara (CMPCG) y específicamente del personal del Área Operativa, ya que este estudio se realizó a partir de la información recabada por dicho personal durante cada temporal de lluvias. Con el presente estudio se contribuye a la primera etapa de la gestión integral de riesgos al incluir el análisis e identificación de los sitios de inundación en el municipio de Guadalajara.

Palabras clave: inundación, recurrencia, peligro, protección civil, zona urbana.

Abstract

This paper analyzed Flood Impact Sites (SAI, abbreviated in Spanish) attended by the Coordination of Civil Protection of Guadalajara (CMPCG, abbreviated in Spanish) from a geospatial approach. It also addressed the distribution of how, when, and where floods affected during the last 12 years (2010-2022). The case study is the urban area of the municipality of Guadalajara. The frequency, distribution and intensity of floods are analyzed yearly and for the entire study period. We obtained a flow depth categorization map using neighborhoods' historical flood level height, where most range from medium to low. Subsequently, the services attended by CMPCG's operational area bases were analyzed, where the most affected sectors are the public roads and the residential sector. We worked with 3,676 SAI contained in the CMPCG flood inventory. The study allows to identify 63 Recurrent Flood Sites (SiRI, abbreviated in Spanish) with the information of the SAI. At the colony scale, they correspond to 65 Recurrent Flood Neighborhoods (CRI, abbreviated in Spanish). In addition, 20 Critical Flood Sites (SiCI, abbreviated in Spanish) are

displayed, which, in addition to meeting the recurrence criteria, also consider the incidence criterion both in the domicile and crossing fields. We can highlight the daily work of the Municipal Coordination of Civil Protection of Guadalajara (CMPCG) and, specifically, the staff of the Operational Area since this study was carried out based on the information gathered by this staff during each rainy season. This study contributes to the first stage of Integrated Risk Management by analyzing and identifying flooding sites in Guadalajara.

Keywords: Flood, recurrence, hazard, civil protection, urban area.

Recibido: 31/07/2023

Aceptado: 02/01/2024

Publicado *online*: 17/01/2024

Introducción

Existen dos fenómenos hidrometeorológicos extremos de amplio interés por el impacto que tienen en los ámbitos económico, ambiental y social: inundaciones y sequías. Estos fenómenos son la clara demostración de que, aunque el agua es el vital líquido para el desarrollo de nuestras actividades diarias y la permanencia de la humanidad en este planeta, cuando se presentan en exceso o escasea de forma drástica genera innumerables daños (ONU, 2021).

Las inundaciones son eventos que se pueden definir como un fenómeno de origen natural o antrópico, en el cual la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un

incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos y mares, generando el anegamiento temporal de zonas que usualmente no lo están. Salazar (2013) define dicho proceso como la expresión dialéctica agua-territorio, fundamental en el dinámico proceso de modelado del paisaje en el planeta tierra. Las inundaciones son un tema que investigadores han posicionado como una de las líneas torales de investigación de los hidrólogos (Kidson & Richards, 2005; Merz *et al.*, 2019; Shaleen & Lall, 2001; Villarini, Smith, Serinaldi, Ntelekos, & Schwarz, 2012).

Cuando un evento de inundación tiene lugar en una zona despoblada, se pueden presentar afectaciones a cultivos en zonas agrícolas y daños a infraestructuras civiles cercanas; sin embargo, es de nuestro conocimiento que a lo largo de la historia los asentamientos humanos se han desarrollado en los márgenes de los ríos (López & Francés, 2013). Es en el contexto anterior que la importancia de los eventos de inundación se amplifica cuando las zonas anegadas son centros urbanos densamente poblados donde puede cobrarse la vida de personas.

A escala global, las inundaciones son las catástrofes más comunes y la principal causa de mortalidad (Merz *et al.*, 2019). Mishra *et al.* (2022), en su revisión sobre el estado actual de las inundaciones, mostraron que las inundaciones continúan siendo los fenómenos que afectan a la mayor cantidad de personas y que experimentan un mayor crecimiento. Aunado a lo anterior, la base de datos internacional de desastres (EM-DAT) muestra que en los últimos 40 años los desastres han experimentado un importante crecimiento en su frecuencia (EM-DAT, 2022).

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo general realizar un análisis geoespacial de las zonas afectadas históricamente por inundación en el municipio de Guadalajara, Jalisco, México, durante el periodo 2010-2022 desde una base de datos de emergencia recopilada por el H. Cuerpo de Bomberos de Guadalajara. El estudio está enfocado en abordar los siguientes objetivos específicos: a) establecer los criterios de recurrencia de los sitios de afectación por inundación atendidos de 2010 a 2022; b) evaluar los servicios por inundación de la Coordinación Municipal de Protección Civil de Guadalajara (CMPCG); c) obtener un mapa de categorización por inundación; d) determinar periodos de retorno a partir del inventario de inundaciones; e) determinar y definir los sitios recurrentes de inundación (SiRI), las colonias recurrentes de inundación (CRI), y los sitios críticos de inundación (SiCI).

Antecedentes

De acuerdo con el Informe Mundial Sobre Desastres (IFRC, 2020), en los últimos diez años los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos desencadenan el 83 % de los desastres que involucran a las inundaciones, tormentas y olas de calor que causaron la muerte de 410 000 personas en los últimos diez años con 1 700 000 000 de personas afectadas por este tipo de desastres a nivel mundial. En tal sentido, las inundaciones son uno de los desastres más frecuentes y peligrosos del mundo (Avila-Aceves, Rocha-Plata, Mojardin-Armenta, & Rangel-Peraza, 2023). Hasta ahora, la concepción dominante respecto a las inundaciones y los cambios en el clima ha sido la del cambio climático como agente activo, y la sociedad como agente pasivo o receptor. Sin embargo, se ha comprobado

que la sociedad es actor completo en este proceso. De hecho, la sociedad es la que, a partir de diversas causas políticas, económicas, socioculturales y ambientales, construye su propia vulnerabilidad.

En los últimos años, las inundaciones causadas por tormentas y huracanes en México se han incrementado, generando cada año graves pérdidas económicas e infraestructura, siendo más evidentes los daños en las zonas costeras del océano Pacífico y el Golfo de México (Haer *et al.*, 2018). En este contexto, el país invierte gran cantidad de recursos en poder restaurar las condiciones de las regiones afectadas, para permitir recuperar las actividades de la población. Resulta evidente la gran vulnerabilidad en grandes regiones del país, así como la ausencia de medidas preventivas (Salas & Jiménez, 2014). El diseño institucional mexicano para enfrentar los cambios que experimenta el clima y los efectos de este en la frecuencia y magnitud de eventos hidrometeorológicos extremos “se ha concentrado más en la acción de reparación y asistencia frente a la presencia de eventos naturales extremos, que en la prevención de los efectos devastadores de los mismos” (Constantino & Dávila, 2011). Los resultados han demostrado el fracaso de las intervenciones reactivas, lo que ha generado una nula reducción del riesgo, y por lo tanto se mantiene la alta probabilidad de materialización del riesgo en desastres con el correspondiente efecto negativo que conllevan.

En ese sentido existen diferentes trabajos que abordan el tema de inundación desde diversas perspectivas de acuerdo con la información disponible y con los niveles de precisión deseados, donde la mayoría se enfoca en la evaluación de inundaciones, lo cual es básico para el diseño de infraestructura, planificación de medidas y políticas de mitigación

enfocadas en los recursos hídricos (Vidrio-Sahagún & He, 2021). El modelado geoespacial de inundaciones ya sea hidrológica o hidráulicamente, en conjunto con los sistemas de información geográfica (SIG), brinda grandes ventajas para identificar inundaciones a gran escala (Avila-Aceves *et al.*, 2023), y es la base para la gestión integral del recurso hídrico en todo tipo de cuencas desde la alta montaña (Ocampo & Vélez-Upegui, 2014) hasta inundaciones pluviales en entornos urbanos (Bulti & Abebe, 2020).

Otros autores, como Elkhachy *et al.* (2021), obtuvieron mapas de peligro de inundación como un apoyo ante respuestas y diseño de planes de emergencias en función de la profundidad y velocidad del agua obtenidas mediante simulaciones con el *software* del sistema de análisis de ríos de los centros de ingeniería hidrológica (HEC-RAS). Maranzoni, Dória y Rizzo (2023) abordaron el tema de las inundaciones a través de un modelado hidrodinámico partiendo de la profundidad máxima del agua y la extensión de la inundación, y así obtener mapas de peligro, considerado como un paso fundamental en el mapeo de riesgo de inundación. Se ha mencionado, además, que como parte de la gestión del riesgo se requieren identificar zonas de inundación con datos de la extensión y altura del nivel del agua, llamadas medidas no estructurales de resiliencia del territorio, y que incluye la evacuación y planes de contingencia (Avila-Aceves *et al.*, 2023). Ante la falta de datos se han utilizado técnicas de multicriterio, probabilísticas y de análisis de información geográfica para obtener áreas con potencial de inundaciones (Vojtek, Vojteková, & Pham, 2021). Por lo tanto, se observa la gran ventaja que se tiene con el inventario de inundaciones de la Coordinación Municipal de Protección Civil de Guadalajara.

Las inundaciones en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) han sido abordadas por diferentes autores, entre ellos destaca el estudio presentado por Ornelas, Castillo y Salazar (2005), donde mencionan que el incremento de las inundaciones y las variables vinculadas con este fenómeno han estado influenciadas exclusivamente por las modificaciones en los regímenes de las cuencas debido al proceso urbano anárquico. Los autores destacan que las nuevas urbanizaciones se desarrollaron sobre lugares de alto riesgo asentadas en zonas topográficamente bajas, cauces, márgenes de canales y bordes; consideran, finalmente, como solución, un ordenamiento por cuenca hidrológica.

En un estudio posterior, Salazar, Juárez y Ramírez (2008) analizaron la intensidad, duración y periodo de recurrencia que pueden alcanzar las precipitaciones en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG). Para ello integraron una base de datos de lluvias máximas en 24 horas y usaron procedimientos estadísticos y empíricos; encontraron que las inundaciones en la ZMG han aumentado por el desmedido crecimiento poblacional, invasión de cauces naturales, deficiente urbanización y por la canalización del agua, lo que sin duda altera las condiciones naturales de suelo y disminuye la capacidad de infiltración y retención de humedad, lo cual provoca el incremento de escurrimiento de aguas pluviales.

Se ha mencionado también que el problema de las inundaciones es de antaño (GacetaUdeG, 2010), pues se inició en la década de 1950 y se ha agravado con el paso de los años, y que se necesita un esquema de magnitud del problema, además de un plan maestro que incluya colectores de acuerdo con el crecimiento urbano, evitar la urbanización en zonas peligrosas y mayores microcuencas que impidan la sustitución de colectores naturales por artificiales.

La vulnerabilidad en sitios dentro de la ZMG afectadas por las inundaciones con pérdidas patrimoniales ha sido recopilado por Torres, Franco, Souza y Lattuada (2019). El estudio destaca el inadecuado funcionamiento del Programa de Manejo Integral de las Aguas Pluviales (PROMIAP) y el Plan Integral para el Manejo de Inundaciones (PIMI), los cuales se promocionaron como la solución para todos los problemas de inundaciones en la ZMG y que, sin embargo, no han logrado mermar la problemática que año con año incrementa el número de colonias con riesgo de inundación en el temporal de lluvias, aunado al incremento de los puntos de riesgo de inundación de 147 (entre recurrencias históricas y recientes) a poseer cerca de 380 de acuerdo con registros del Instituto de Información Estadística y Geográfica e información del inventario de riesgos que elabora la Unidad Estatal de Protección Civil y Bomberos de Jalisco.

La ocurrencia de inundaciones en Guadalajara es una construcción social originada dentro de procesos externos e internos de la vida diaria de las personas (Durán, 2019), por ello es importante recurrir al contexto histórico para explicar los procesos que configuran dichos desastres. Las autoridades de diferentes coordinaciones, instituciones y dependencias del gobierno de Guadalajara involucradas con alguno de los temas del inicio y preparación del temporal de lluvia realizan cada año esfuerzos para estar preparados. Entre las principales actividades se incluyen visitas a campo en los principales SAI para detectar necesidades como poda de árboles, preparación de refugios, limpieza de canales, ríos, arroyos y bocas de tormentas; también se tiene el desalojo de personas en situación de calle, dado el paso de corrientes de agua, puentes y canales. Estas actividades contribuyen con las preparaciones por parte de las

dependencias de gobierno ante el inicio del temporal de lluvias; es importante implementar soluciones de mayor alcance para aminorar el riesgo de la población.

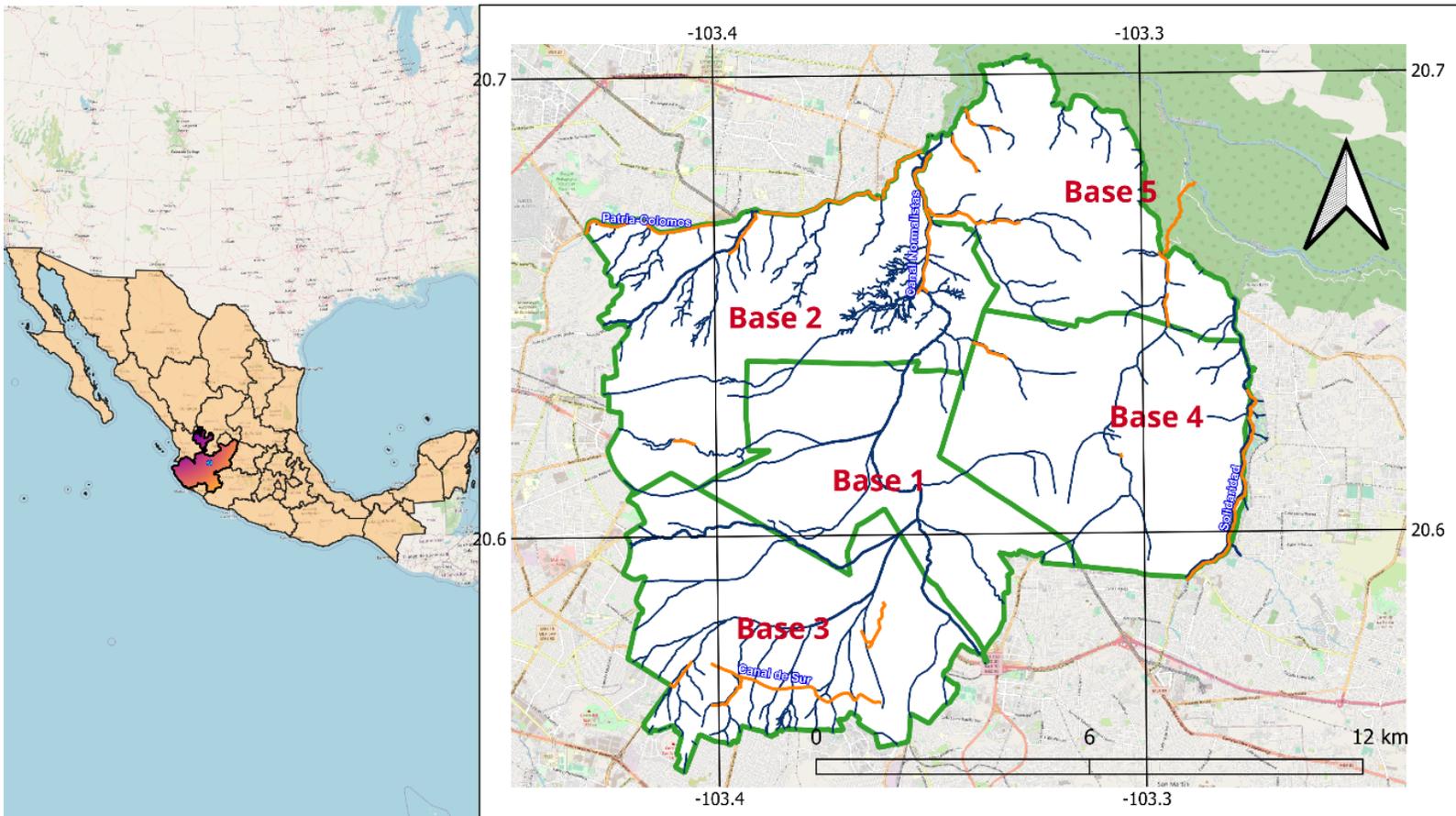
Cada evento de precipitación en el municipio de Guadalajara y específicamente los primeros eventos de la temporada ocasionan algún tipo de daño; por ello, contar con un análisis del inventario de inundaciones que corresponden a datos in situ derivado de la atención a emergencias o evento significativo de inundación en el municipio de Guadalajara es un primer paso para iniciar con un esquema preventivo ante desastres para reducir así la atención de servicios, y que dicho documento sirva para la reconstrucción de daños al implementar estrategias y programas de largo alcance enfocados a prevenir y reducir efectos, y con esto lograr un municipio menos vulnerable frente a fenómenos extremos como las inundaciones.

Área de estudio

El municipio de Guadalajara se localiza entre las coordenadas de 103.26°W y 103.40°W y 20.6° a 20.75°N, y es la capital del estado de Jalisco. México tiene 126 millones de habitantes de los cuales Jalisco tiene 8 348 151 millones y en Guadalajara se concentran 1 385 629 de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La ciudad de Guadalajara ha desempeñado un papel indispensable en la economía del estado de Jalisco; en el año 2000 albergaba a un 56 % de la población estatal por el incremento de las migraciones del interior del estado y de otras entidades federativas, creando déficit en las necesidades de

infraestructura (Herrera & Huizar, 2005). El proceso de expansión de la mancha urbana inició hace unos 50 años, consumiendo el espacio con modificaciones profundas, como fraccionamientos irregulares en la zona conurbada de Guadalajara, división de lotes de manera irregular, e impulso a la industrialización que generó expansión hacia las zonas ejidales y desaparición de zonas agrícolas. La zona de Guadalajara ocupa la parte sur de la altiplanicie mexicana, conocida como meseta de Anáhuac; limita al sur con el eje volcánico, al oeste con la Sierra Madre Occidental y al este con la Sierra Madre Oriental. Los máximos de precipitación acumulada en Guadalajara dentro del periodo de estudio comprendieron los años 2010 con 1 025.4 mm, 2013 con 1 057.2 mm, 2015 con 1 252.1 mm, 2018 con 1 052.3 mm y 2022 con 1 482.8 mm (IAM, 2023).

La CMPCG cuenta con cinco estaciones —también nombradas bases de bomberos— distribuidas por todo el municipio de Guadalajara (Figura 1), las cuales son encargadas de cubrir diferentes zonas para tener accesibilidad pronta y oportuna siempre al servicio de la población, ya que durante el temporal de lluvias en el municipio de Guadalajara —que abarca de junio a octubre— se incrementa la demanda de servicios por parte de la población del municipio hacia la Coordinación Municipal de Protección Civil de Guadalajara.



Municipio de Guadalajara, Jalisco, México

Simbología

- Canal_pluvial
 - Cauces
 - Cobertura base en el municipio
- OpenStreetMap

Figura 1. Distribución espacial de las bases de la CMPCG en el municipio de Guadalajara, Jalisco, México. Localización de los ríos y canales pluviales.

Metodología

La CMPCG, encargada de salvaguardar la vida, bienes, servicios y entorno de la población, alberga al Heroico Cuerpo de Bomberos de Guadalajara y como parte de sus actividades se encuentran los siguientes: atención de incendios, inundaciones, accidentes automovilísticos, fugas de gas y derrame de sustancias químicas, entre otros. En este caso, el estudio se enfoca exclusivamente al análisis de las alturas de inundaciones como una primera parte de la estrategia de prevención.

Recopilación y análisis de datos

La CMPCG se enfoca año con año en atender emergencias derivadas por el temporal de lluvias. Desde 2010 y hasta la fecha se ha creado y almacenado dentro de la base de datos de emergencia un inventario de inundaciones que comprende el periodo 2010-2022, producto de la atención solicitada de la población a dicha institución y que contiene información como domicilio del sitio de afectación, que es equivalente al servicio atendido y a la inundación en sí, ya que el bombero acude al sitio porque existe un daño derivado de este fenómeno que ha sido reportado a las cabinas de comunicación de la CMPCG, además de datos de altura de la inundación, colonia, cruce y número de bomberos que acuden, entre otros.

El inventario de inundaciones contiene entonces los sitios de afectación por inundación (SAI), que son recopilados en tiempo real de manera manual a partir de un trabajo en conjunto; se pasa la información a otros bomberos, llamados "escribientes", encargados de digitalizarla,

donde se almacena y se descarga desde una base de datos llamada captura de servicios, que se encuentra en proceso de mejora continua para trasladar la información a una nueva plataforma llamada SPRINT, creada en 2022 por personal de la Dirección de Planeación de dicha institución.

Este inventario de inundaciones se convierte en una parte muy importante de la CMPCG, pues autores mencionan que los datos de inundaciones y específicamente los daños son muy raros de encontrar y es menos frecuente que los datos hidrométricos; en algunos casos existen, pero con restricciones de privacidad. Un aspecto de vital importancia es el análisis inicial de los datos, donde en una primera instancia se detectaron cuestiones básicas, como la ortografía de las calles, colonias, cruces y referencias del sitio de la inundación. Además, se necesitaba que la base de datos fuera de calidad, y para ello se aplicó limpieza y filtrado de la base de datos mediante tablas dinámicas de Excel para eliminar aquellos datos espurios como errores muy marcados en la altura de la inundación, o detección de ubicaciones que no contaban con coherencia entre las colonias, cruces, referencias y calles. Este paso fue indispensable para trasladar la información a un SIG; en este caso se utilizó Google Earth Pro para obtener la georreferenciación de los sitios de inundación. Finalmente se obtuvieron 3 676 servicios atendidos, equivalentes a los sitios de afectación por inundación (SAI) (Figura 2).

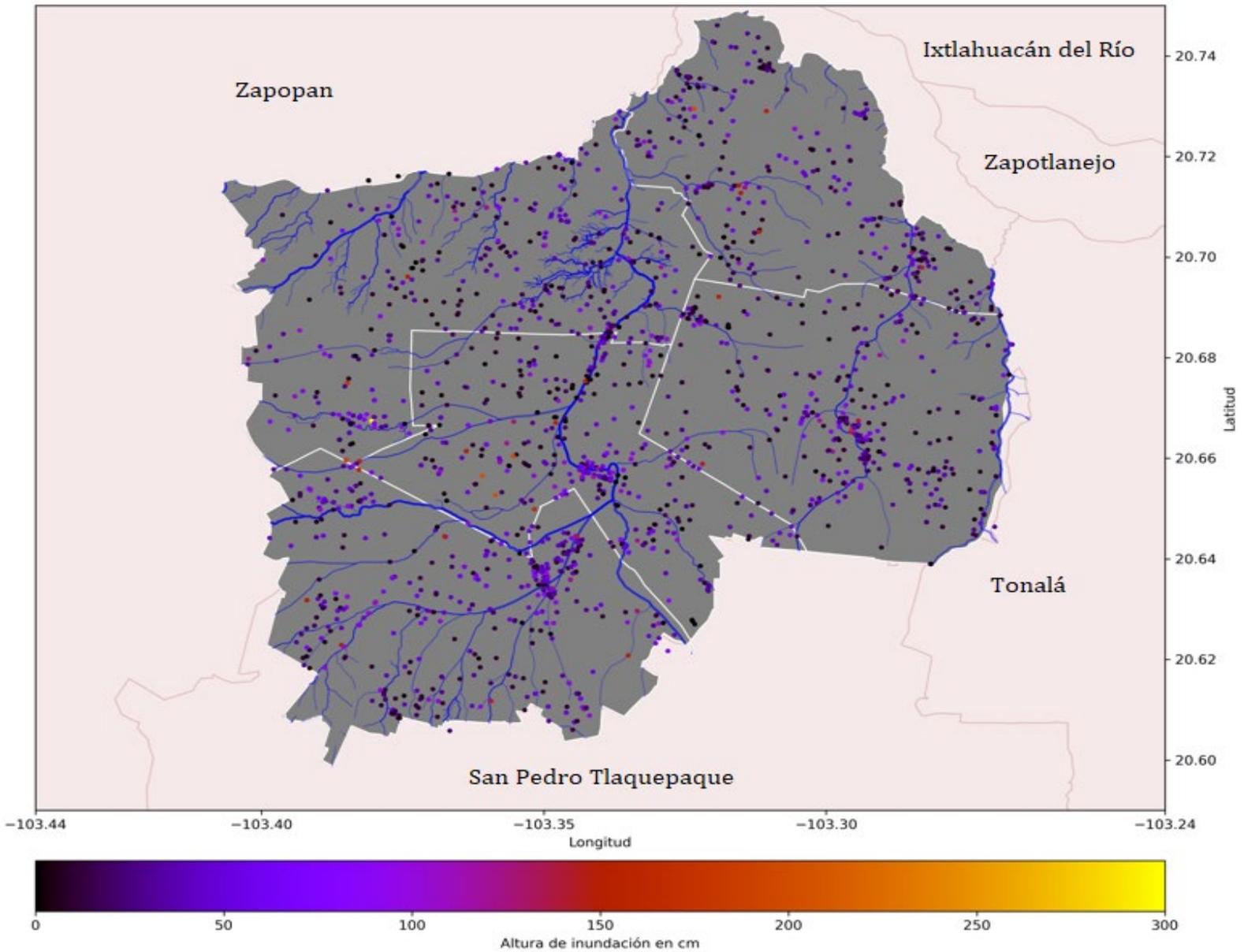


Figura 2. Sitios de afectación por inundación (SAI) el municipio de Guadalajara en el periodo 2010-2022, donde la escala de color indica el tirante de agua registrado.

La revisión exhaustiva de la información permite generar un inventario de inundaciones robusto y de calidad que es base para asegurar certidumbre y fidelidad de los resultados que derivan del presente estudio. La información geográfica fue manipulada en el Sistema de Información Geográfica QGIS en su versión 3.28.1, el cual es de libre acceso. La proyección utilizada para los datos generados vectoriales y ráster fue el sistema geodésico de coordenadas WGS 84.

Una vez identificados los SAI, se implementaron técnicas estadísticas descriptivas, como las medidas de tendencia central, las medidas de tendencia relativa y los gráficos de cajas, los cuales proporcionan información sobre la calidad de los datos.

Análisis de los sitios de afectación por inundación

En la primera parte del análisis se asociaron y contabilizaron los SAI atendidos durante el periodo 2010-2022 anualmente a una base o estación de bomberos. La segunda asociación que se realizó fue identificar el número de eventos de precipitación con base en la fecha en que se atendieron los servicios; esto corresponde a una aproximación de la incidencia del evento, pues como se sabe, durante un día puede precipitar más de una vez y en esta base de datos no se cuenta con la hora de la atención del servicio; cabe mencionar que los resultados encontrados no se evalúan con estaciones. Los cálculos se obtuvieron con ayuda del lenguaje de programación Python y la librería de Pandas, misma que se utilizó para la asociación de los sitios históricos de afectación por inundación con las estaciones de servicio de bomberos de la CMPCG,

llamadas comúnmente bases, lo que permitió obtener porcentajes de los servicios atendidos durante el temporal de lluvias.

Los servicios de atención por inundación proporcionan un panorama de las cargas de trabajo presentes durante el temporal de lluvias, para posteriormente, y de ser necesario, tener una mejor organización en cuanto a equipo o personal en dichas estaciones de bomberos y con ello mejorar la respuesta del personal de la CMPCG. De igual forma, del inventario de inundaciones se extrajo información referente a la afectación en sectores y se identificaron aquellos que han presentado una mayor vulnerabilidad a las inundaciones en el municipio de Guadalajara y cuáles son los que año con año han requerido una mayor atención por parte del personal de operaciones de la CMPCG.

En el marco del análisis geoespacial se obtuvieron interpolaciones para observar aquellas zonas donde tiende a concentrarse el mayor número de sitios de afectación por inundaciones o lo que es equivalente a los servicios atendidos, utilizando para ello el método del inverso de la distancia. Estos análisis se llevaron a cabo con rutinas en Python y librería de Geopandas.

Se aborda también un análisis estadístico descriptivo de las alturas de inundación reportadas en el inventario de inundaciones, lo cual permite observar su distribución y frecuencia.

Generación del mapa de categorización por nivel inundación

Se obtuvo un mapa de categorización por nivel de inundación del municipio de Guadalajara, para ello, una vez georreferenciados los puntos de inundación, se ubicaron dentro del municipio de Guadalajara, se agregaron las colonias y se realizó una unión de atributos por localización, a fin de poder asociar los niveles de inundación a cada colonia considerando aquellos puntos de inundación que contiene, caen dentro y solapan al polígono de colonia usando el *software* QGIS. Se realizó después el promedio de la altura de inundación de cada punto localizado dentro de cada polígono de colonia usando la herramienta de procesos *agregar* en QGIS, y luego se asignó una categoría de rango bajo a crítico. A pesar de que existen criterios de peligro usados en diversos países para evaluar las inundaciones (Alcocer-Yamanaka, Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Góngora, 2016), trasladar los criterios empleados al municipio de Guadalajara requeriría distintos ajustes, y en este sentido y dirigido hacia el desarrollo de un estudio e investigación más local, se ha procedido a realizar un análisis de la altura de inundación recopilada en el municipio de Guadalajara con una respectiva clasificación de rangos locales y de mayor frecuencia suscitados año con año. Otros mapas de peligro se han realizado anteriormente tal cual lo menciona el documento de Durán (2019).

Los rangos de colores se seleccionaron conforme a la escala cromática empleada en la representación de amenaza, vulnerabilidad, riesgo y peligro (Sedatu, 2016); para determinar los rangos de categorización de altura de inundación se aplicó un análisis de frecuencia

de acuerdo con los resultados del análisis: el rango bajo de inundación corresponde a un nivel menor o igual a 25 cm; el rango medio, a valores mayores de 25 y menores de 70 cm; mientras que en el rango alto los valores oscilan entre 70 y 100 cm, y el rango crítico concierne a aquellos valores mayores que 100 cm.

Obtención de los sitios y colonias recurrentes de inundación (SiRI y CRI), y sitios críticos de inundación (SiCI)

Se partió de un total de 3 676 SAI, que es equivalente a los servicios atendidos por personal de la CMPCG. Los sitios recurrentes de inundación (SiRI) se definieron en este documento como los lugares con cierto grado de afectación que cumplen con los siguientes criterios de recurrencia:

- Un acumulado anual mayor o igual a 25 cm de lámina de inundación.
- Frecuencia histórica mayor o igual a 12 sitios de afectación por inundación, considerando a todos los sectores como vía pública, comercio y casa habitación, entre otros.

Las colonias recurrentes de inundación (CRI) se definieron como aquellas colonias con mayor acumulado histórico de inundación y mayor frecuencia histórica aunada a la aplicación de criterios de recurrencia.

Finalmente, los sitios críticos de inundación (SiCI) se definieron como aquellos que corresponden a los valores de frecuencia más altos registrados en la base de datos histórica y que además cumplieran con

los criterios de recurrencia e incidencia tanto en el campo de domicilio como el campo de cruce.

Resultados

En este apartado se muestran los resultados generados en el estudio y se realiza una discusión sobre los mismos.

Análisis de los sitios de afectación por inundaciones en Guadalajara

Se muestran a continuación los resultados del análisis de las inundaciones. Cabe recalcar que los SAI son equivalentes a los servicios atendidos que se derivan únicamente por el temporal de lluvia.

En la Figura 3a se muestra el número de servicios atendidos en el municipio de Guadalajara. El mayor número de servicios fue en los años 2010 y 2014 con 470 servicios, y un máximo de 500 servicios de inundación en 2015; se puede observar que a partir de 2017 ha habido una disminución de los servicios atendidos. Por otro lado, en la Figura 3b se muestra el resultado de un aproximado del número de eventos de precipitación, con un máximo de 67 eventos de precipitación en 2010; se observa una clara disminución con el paso de los años, que pasa de 57 eventos en 2018 a un mínimo de 23 en 2022; de manera general se observa que cada año se presenta un número de eventos de precipitación por arriba de 40, con excepción de 2019 y 2022.

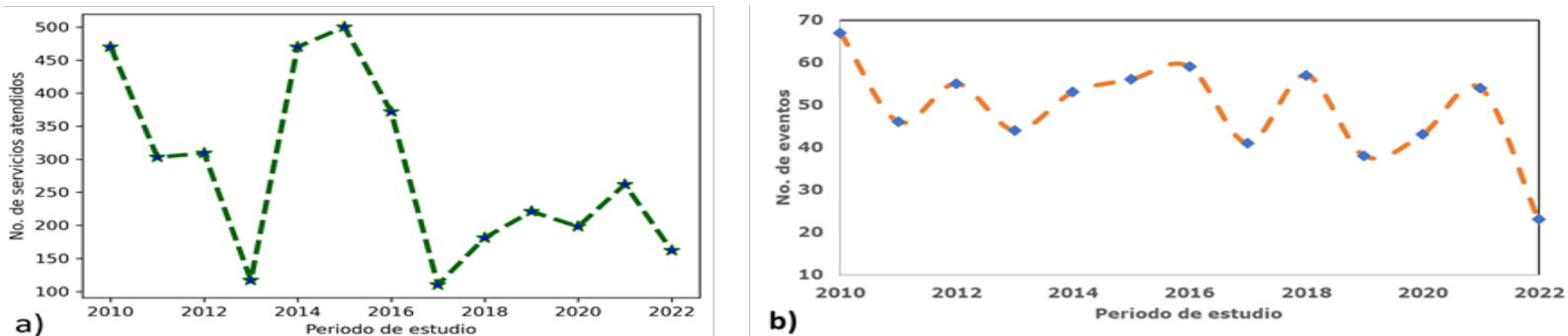


Figura 3. a) Número de servicios atendidos por año en la CMPCG, asociados con sitios de afectación por inundación; b) aproximado del número de eventos históricos de precipitación en el municipio de Guadalajara.

Por otro lado, la temporada de huracanes de 2015 fue de las más activas de los últimos tiempos, con presencia de 22 ciclones tropicales en el océano Pacífico y donde se recuerda al huracán Patricia como uno de los más intensos, dado que en tan solo 24 horas se intensificó a huracán de categoría 5 y que por supuesto sus efectos alcanzaron al estado de Jalisco (Conagua, 2015); 2014 tuvo también una importante actividad ciclogénica (SMN, 2023).

Análisis de frecuencias de la altura de inundación

La distribución de frecuencia de las alturas de inundación se puede observar en la Figura 4a, donde se exhibe una distribución asimétrica con sesgo a la izquierda, siendo esto resultado de que el 83 % de los eventos se concentra entre alturas de 1 y 73 cm. El resultado observado es el común en registros de eventos extremos hidrológicos. La Figura 4b

muestra el comportamiento de la mediana, los cuartiles del 25 y 75 %, y el máximo y mínimo de los registros. El comportamiento de la mediana no exhibe un cambio gradual (tendencia) o brusco (ruptura) al igual que los cuartiles; donde sí se observa una tasa de decremento es en el comportamiento del máximo, y el número de sitios o servicios registrados.

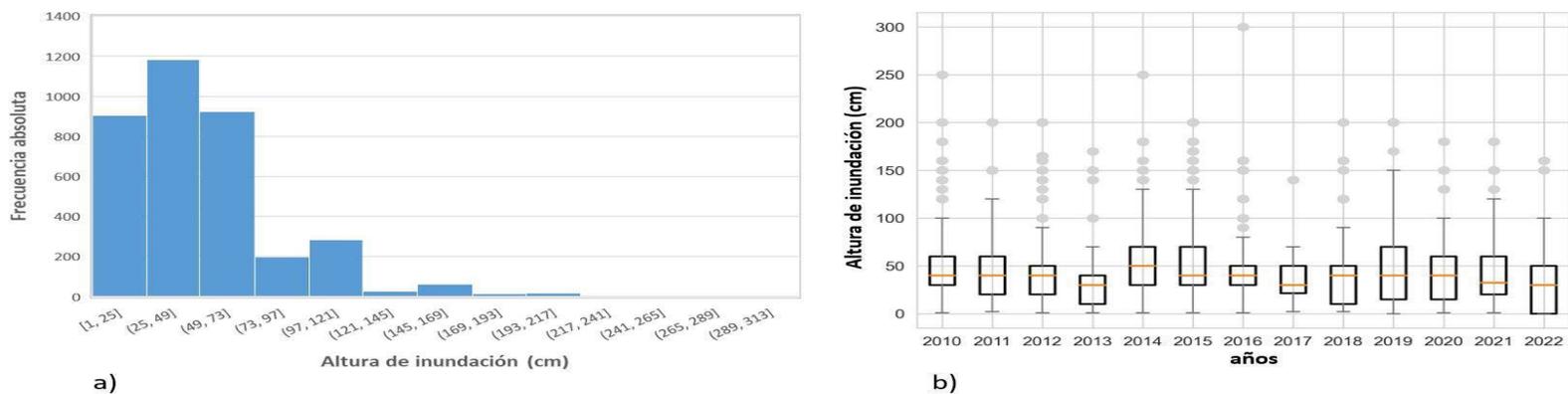


Figura 4. a) Histograma de frecuencia de los registros de altura de inundación; b) gráficos de cajas donde se presentan los cuartiles del 25, 50 y 75 %, y la desviación estándar.

La curva de frecuencia de las alturas de inundación máxima anual se tiene en la Figura 5a, donde se puede identificar el periodo de recurrencia de las inundaciones. Se observa un salto en dos periodos de retorno en las inundaciones con periodo de retorno mayor o igual a 2 y 5 años, donde se tienen incrementos importantes en las alturas de inundación. La Figura 5b permite identificar la probabilidad de no excedencia asociada con cada evento; las inundaciones inferiores a 200 cm están asociadas con probabilidades inferiores a 40 %, mientras que una altura de inundación superior a 100 cm se puede presentar cada año,

y cuenta con una probabilidad de presentarse o exceder ese valor mayor de 90 %. La sistematización de las profundidades de inundación y su asociación con periodos de retorno puede ser una herramienta para incorporar al diseño de infraestructura y la generación de los planes de contingencia, además de poder llevar este análisis a nivel de colonia.

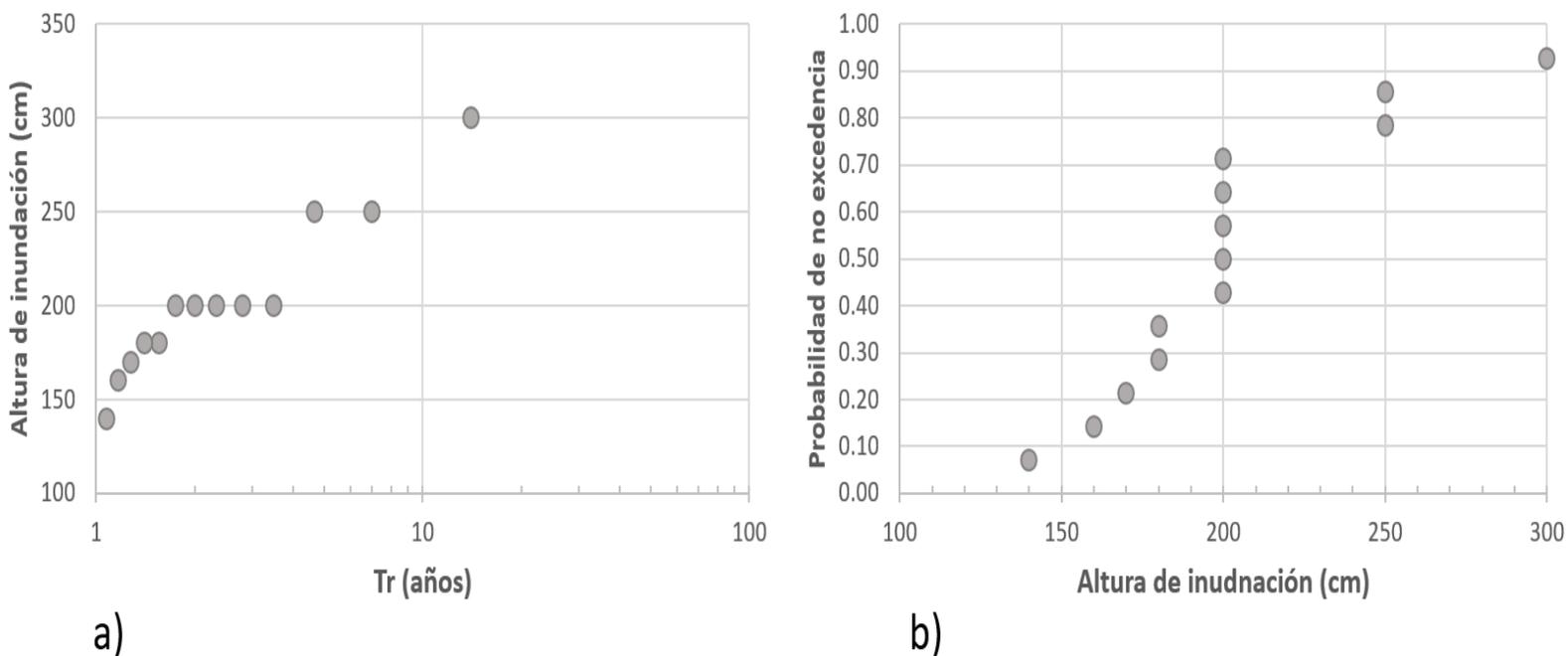


Figura 5. a) Curva de frecuencia de las alturas de inundación máximas anuales registradas; b) probabilidad de no excedencia de las alturas de inundación máximas anuales.

Evaluación de los servicios atendidos de la CMPCG

Es importante conocer el porcentaje de servicios atendidos por bases de bomberos, ya que proporciona un panorama de las cargas de trabajo presentes durante el temporal de lluvias, para posteriormente, y de ser necesario, tener una mejor organización en cuanto a equipo o personal en dichas bases de bomberos y con ello mejorar la respuesta del personal de la CMPCG. En la Figura 6 se observa el porcentaje de servicios históricos atendidos por cada una de las bases de bomberos, donde la base 3 es la que históricamente ha atendido un mayor número de servicios asociados con inundación con un 31.6 %, seguido por la base 1 con un 20.6 % y la base 2 con un 18.6 %. La base 5 es la que históricamente ha tenido una menor actividad durante el temporal de lluvias con un 11.6 %, mientras que la base 1 (Figura 7) ha tenido mayor actividad en 2019 y 2022.

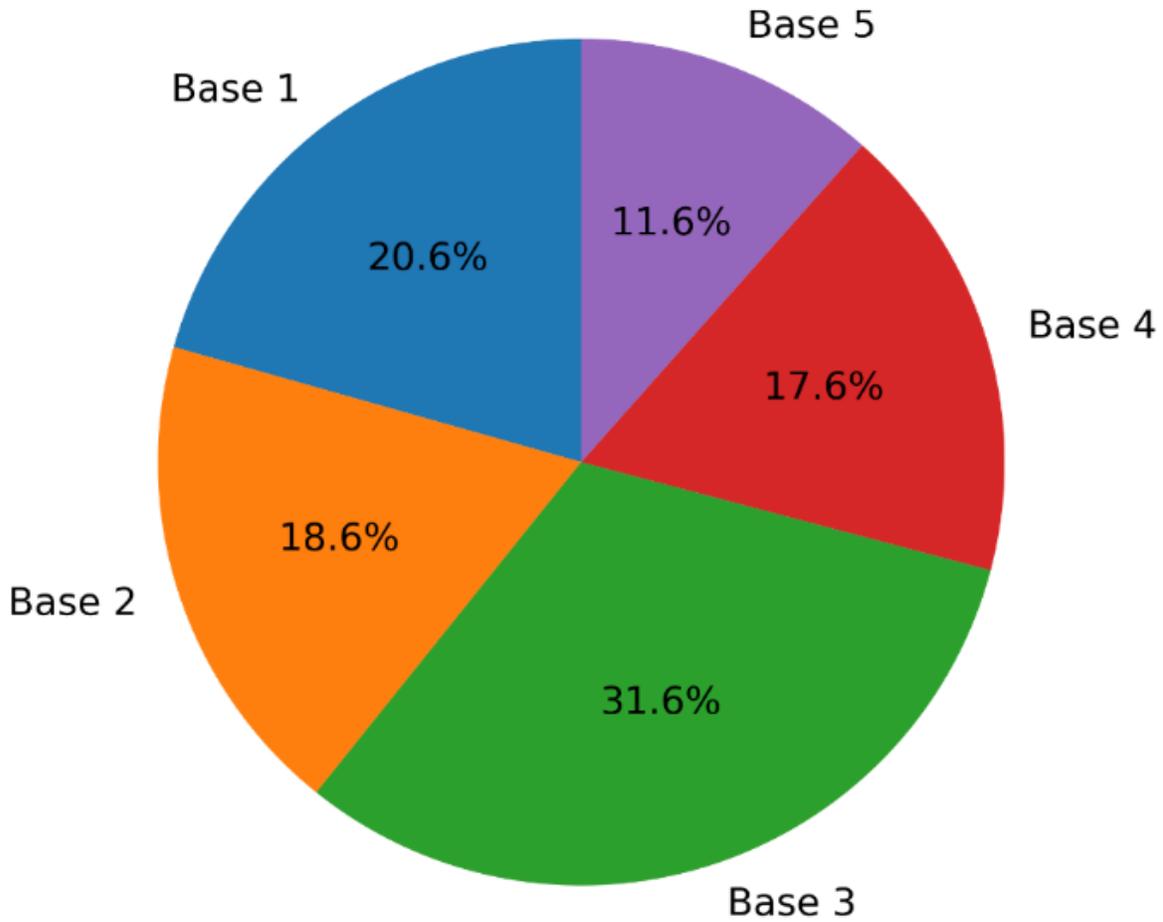


Figura 6. Porcentaje histórico de servicios de inundación atendidos por bases en la CMPCG.

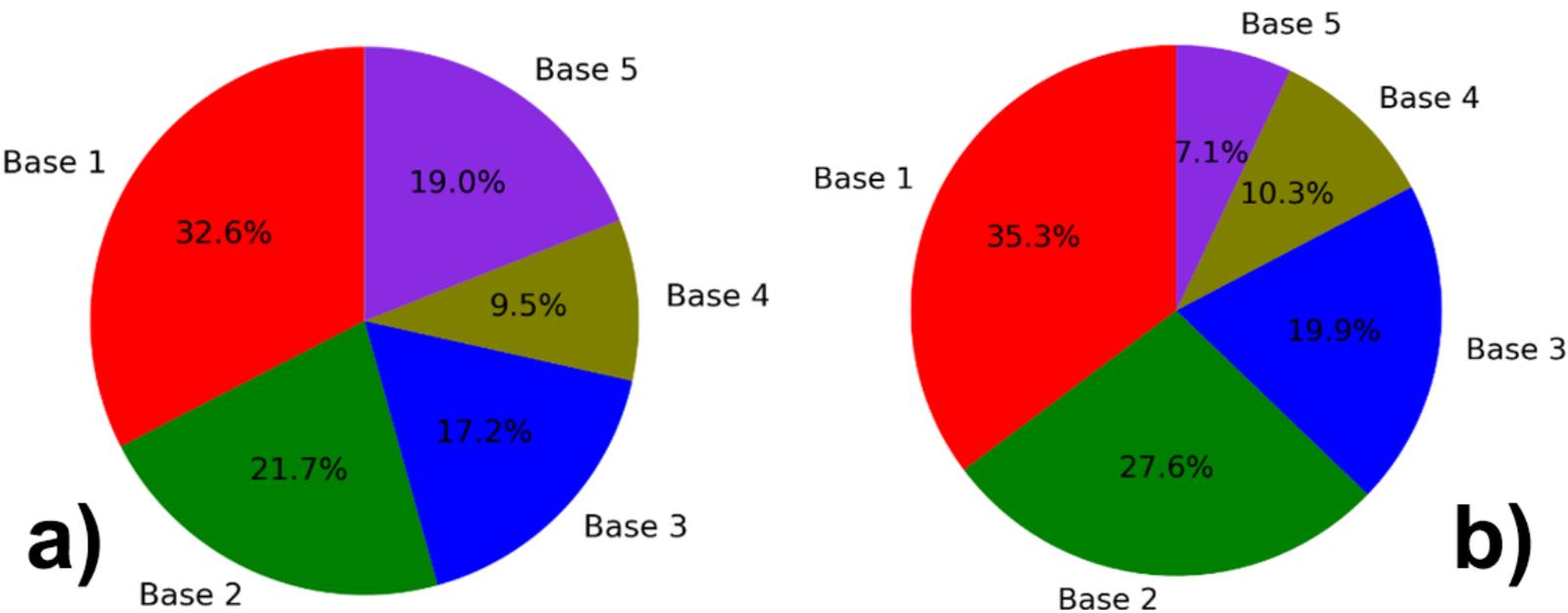


Figura 7. Porcentaje histórico de servicios de inundación atendidos por el personal de la CMPCG durante 2019 (a) y 2022 (b).

Se pueden observar muy claramente en la Figura 8 los sectores históricamente más afectados por las inundaciones, entre ellos: la vía pública, con 2 369 atenciones históricas por parte los bomberos hacia la población; casa habitación con 954 atenciones; establecimientos de servicio con 170 atenciones por alguna emergencia por inundación; establecimientos comerciales con 92, y pasos a desnivel con 27 atenciones. Hay otros sectores que han tenido afectaciones con un número menor a cuatro, como escuelas y canales, que no se han considerado en los resultados de la Figura 8.

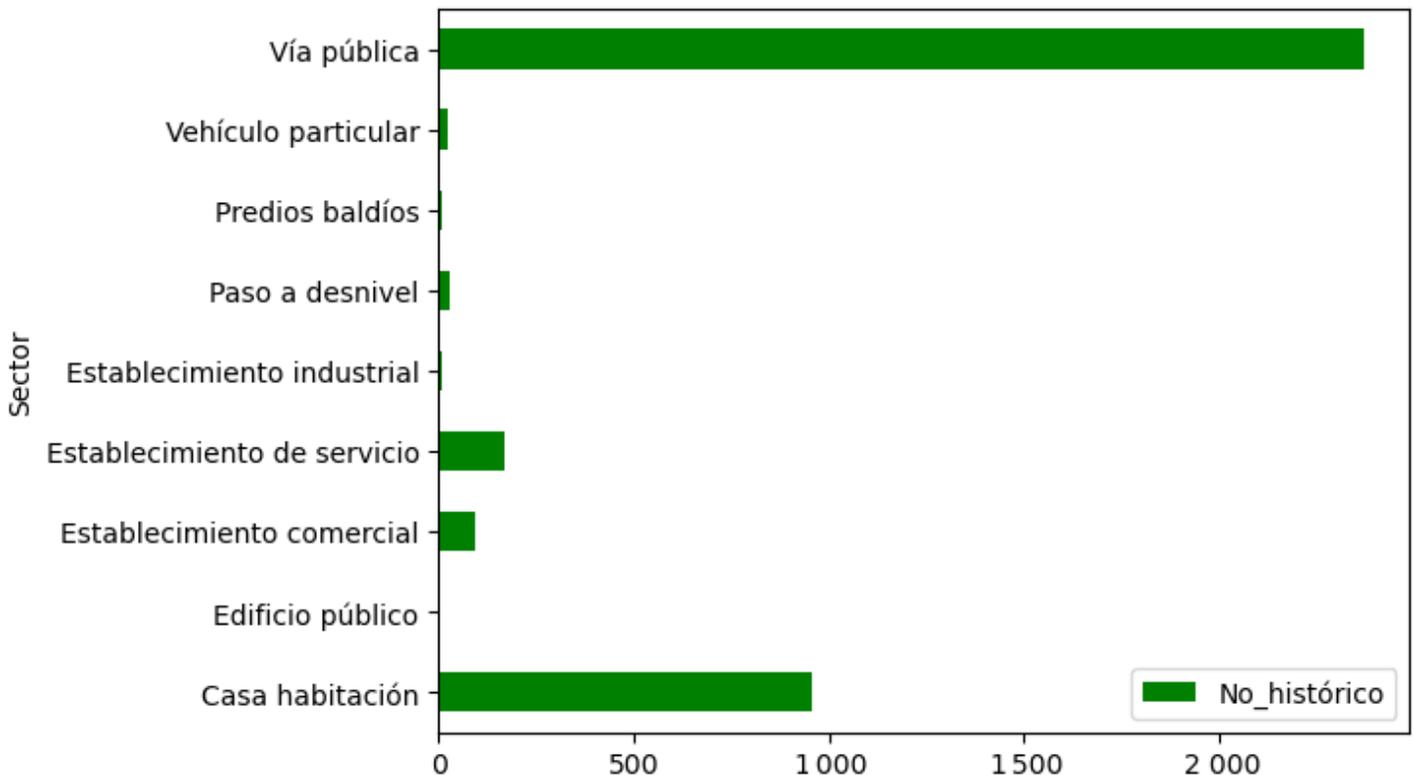


Figura 8. Sectores históricamente más afectados por el temporal de lluvias de acuerdo con el número de servicios atendidos.

Mapa de categorización por nivel de inundación

Muchos de los asentamientos irregulares, contaminación, invasión de canales, ríos y arroyos en el municipio de Guadalajara están asociados con la falta de conocimiento de lo que esto conlleva, así como desinterés de los conceptos básicos para la conservación y calidad de vida. En la Figura 9 se presenta un mapa de categorización de acuerdo con los rangos de frecuencia de los niveles de inundación, los cuales van desde un nivel bajo (en color verde) a un nivel crítico (en color rojo), donde el rango predominante de categorización corresponde al nivel bajo a medio, con

una mayor tendencia a nivel alto de inundación en la parte centro-sur del municipio, justo donde se observa el mayor número de afluentes. Con este mapa se pueden visualizar las colonias que año con año representan un nivel medio y alto de inundación en el municipio de Guadalajara, y las colonias que hasta el momento han presentado inundaciones no tan significativas y que seguramente han sido menos frecuentes, o con un tirante por debajo del parámetro establecido en este estudio de altura de inundación.

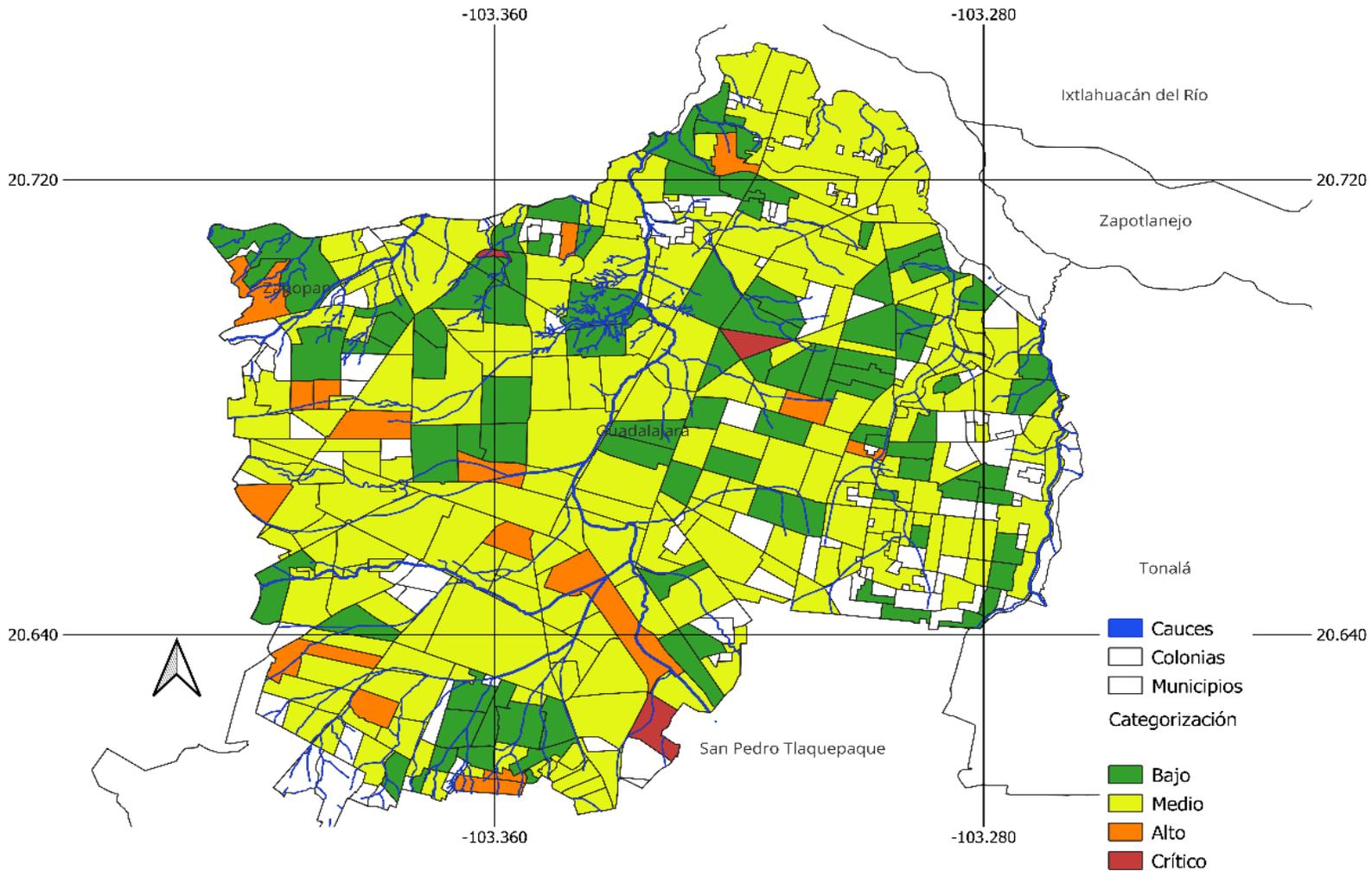


Figura 9. Mapa de categorización de nivel de inundación a escala de colonia.

Sitios y colonias recurrentes de inundación (SiRI y CRI) y sitios críticos de inundación (SiCI)

Una vez aplicados los criterios de recurrencia, se obtuvieron 63 SiRI, de los cuales se presentan únicamente 20 SiRI de los 63 sitios obtenidos (Tabla 1).

Tabla 1. SiRI con un mayor nivel de inundación y frecuencia históricas acumulada (20 de un total de 63 sitios).

Núm.	Domicilio	Nivel acumulado (cm)	Frecuencia histórica
1	Av. Belisario Domínguez	2 566	54
2	C. Lope de Vega	2 750	43
3	Artes Plásticas	2 830	47
4	Av. Enrique Díaz de León	2 860	37
5	C. Las Conchas	3 015	48
6	Calz. Independencia Nte.	3 145	72
7	J. Salomé Pina	3 185	54
8	C. José Luis Verdía	3 940	64
9	Av. Niños Héroes	4 020	77
10	Av. Cvln. División del Norte	4 031	55
11	Av. Isla Pantenaria	4 620	49
12	Av. Inglaterra	4 810	69
13	Av. Washington	5 085	63
14	Av. Mariano Otero	5 596	64
15	Tuberosa	6 775	118
16	C. 32	6 790	137
17	Av. Miguel López de Legaspi	7 125	152
18	Calz. Lázaro Cárdenas	7 791	105
19	Av. Cristóbal Colón	8 968	130
20	Av. Gobernador Luis G. Curiel	11 700	208

El análisis permitió identificar 65 CRI dentro de las cuales se tienen 1 240 SAI, y al hacer la interpolación se observa dónde se focalizan las mayores afectaciones, en la Figura 10 se muestra que se dan en la parte centro-sur de Guadalajara, seguido por la parte suroccidente y oriente del municipio.

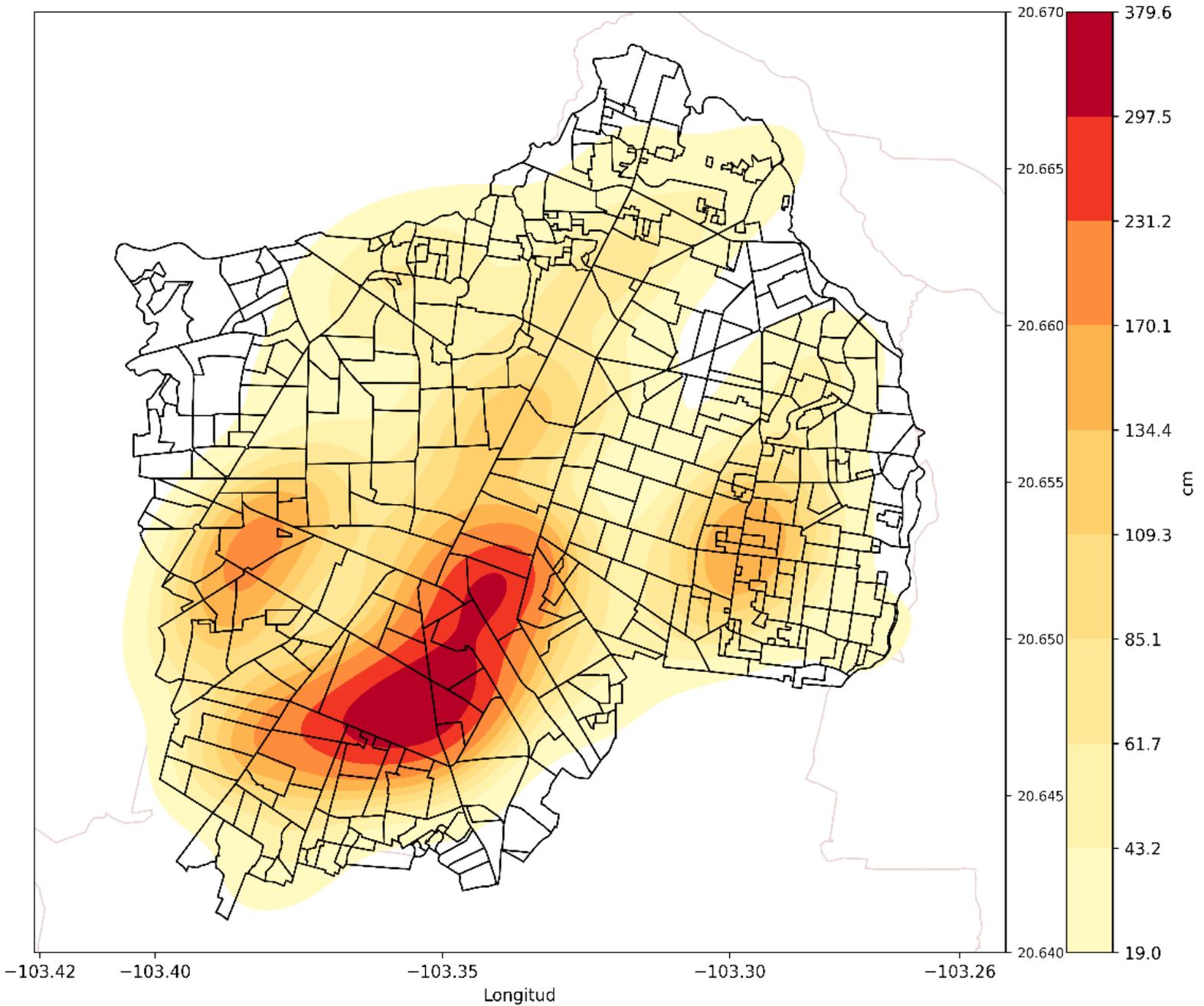


Figura 10. Mapa de distribución espacial de los SAI localizadas dentro de las CRI.

La Figura 11 permite observar las colonias que han presentado la mayor frecuencia histórica (barras azules) y nivel de tirante de agua (barras rojas), a las cuales también se les podría llamar colonias críticas por inundación y entre las cuales se encuentran las siguientes: Colon Industrial, Miravalle, Jardines del Bosque, San Carlos y El Dean, principalmente. En total resultaron 65 colonias con inundaciones importantes durante los últimos 12 años de un total de 362 colonias del municipio.

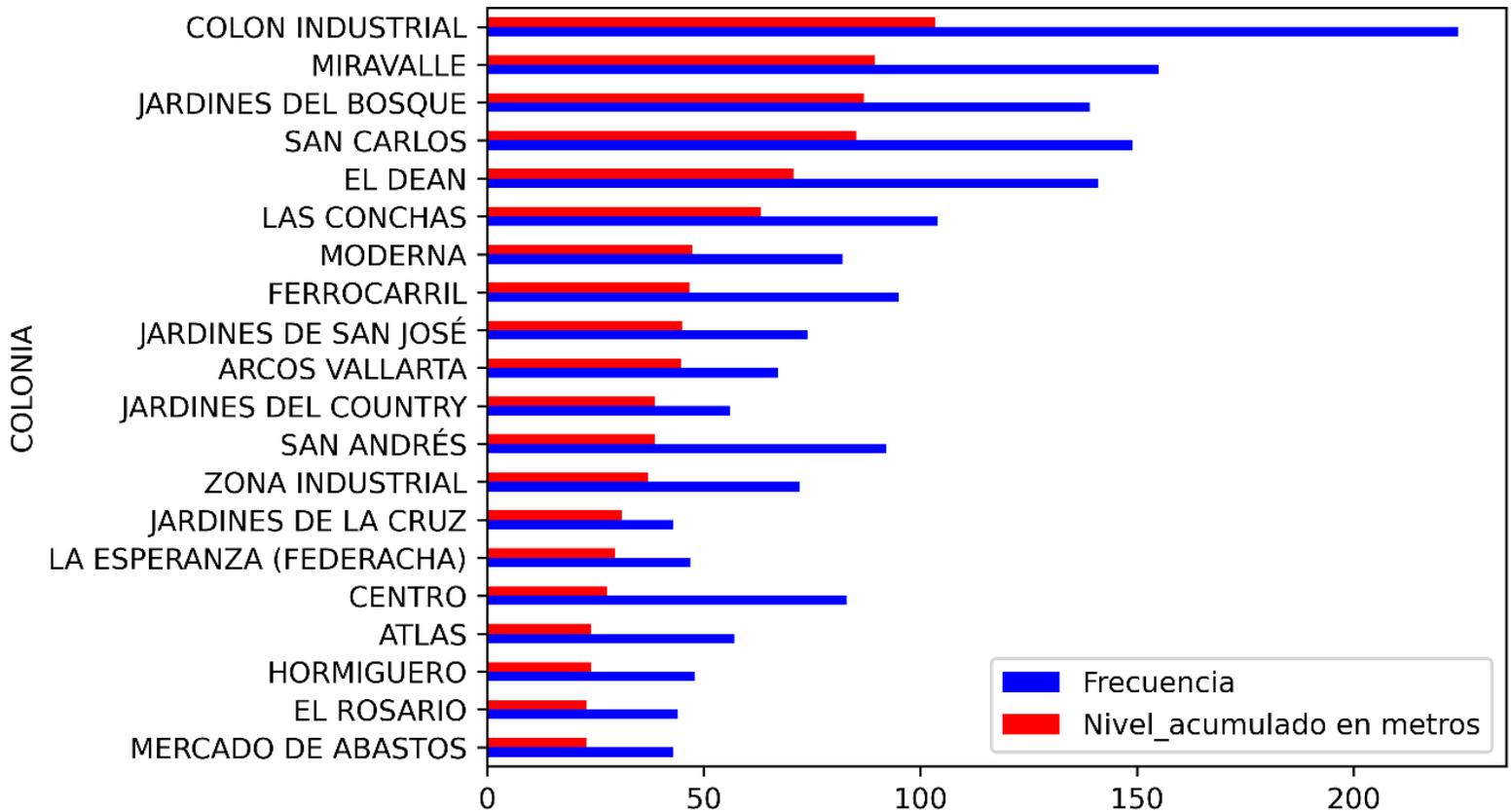


Figura 11. Principales CRI con mayor tirante de agua (barras rojas) acumulado por colonia y frecuencia de sitios históricos de afectación por inundación en el municipio de Guadalajara (barras azules).

Finalmente, se obtuvieron los SiCI, donde aparte de cumplir con los criterios de recurrencia debieron cumplir con el criterio de incidencia al tener el mismo campo de domicilio y el mismo campo de cruce, y se obtuvo un total de 20 SiCI (Tabla 2), donde el valor máximo tiene una frecuencia histórica de 120 y un nivel acumulado histórico de 5 835 cm.

Tabla 2. SiCI, los cuales cumplieron con los criterios de recurrencia e incidencia tanto en domicilio como en cruce.

Núm.	Domicilio	Cruce	Nivel acumulado (cm)	Frecuencia histórica
1	Hilaria Ríos	C. Manuel de Falla	440	12
2	Félix Palavicini	Av. Cvln. División del Nte.	610	12
3	Río Tuxcueca	Río Tizapán	670	13
4	Av. del Parque	C. Europa	740	15
5	C. 11	C. 14	827	16
6	Av. de la Pintura	Av. Gobernador Luis G. Curiel	880	13
7	C. 1	Av. Gobernador Luis G. Curiel	890	16
8	Av. Belisario Domínguez	C. Joaquín Romero	895	16
9	C. José Luis Verdia	Tuberosa	1 070	15
10	Av. Faro	Av. de las Rosas	1 310	24
11	Av. Niños Héroes	Av. Inglaterra	1 320	20
12	Tuberosa	C. Las Conchas	1 450	27
13	Tuberosa	C. José Luis Verdia	1 470	25
14	Av. Niños Héroes	Av. de los Arcos	1 770	36
15	Artes Plásticas	Av. Gobernador Luis G. Curiel	1 960	33
16	C. Lope de Vega	Av. Inglaterra	2 620	41
17	J. Salomé Pina	Av. Gobernador Luis G. Curiel	2 665	47
18	Av. Isla Pantenaria	Av. Cristóbal Colón	4 620	49
19	Calz. Lázaro Cárdenas	Av. Mariano Otero	5 085	56
20	Av. Miguel Lopez de Legaspi	C. 32	5 835	120

Discusiones

Una parte muy importante de este estudio es la base de datos con información que ha sido recopilada por el personal de operaciones de la CMPCG, ya que muchos de los estudios sobre inundaciones se basan en modelaciones hidráulicas e hidrológicas para obtener datos de altura de inundaciones, o mediante técnicas de multicriterio y otras técnicas probabilísticas para obtener áreas con potencial de inundaciones (Avila-Aceves *et al.*, 2023; Vojtek *et al.*, 2021). Otros autores (Pistrika *et al.*, 2014) mencionan que los datos de inundaciones y específicamente los daños son muy raros de encontrar, mucho más que los datos hidrométricos; en algunos casos existen, pero con restricciones de privacidad. Por lo tanto, se observa la gran ventaja que se tiene al contar con un inventario de inundaciones en la CMPCG con datos tomados in situ en el momento justo de máxima intensidad o al inicio de la precipitación, y se puede decir que son prácticamente en tiempo real. Es importante destacar que la base de datos no contiene la hora de atención de los servicios de emergencia, la cual sería importante para identificar los posibles eventos de precipitación, pues muchas veces se atienden varios servicios al día por diferentes eventos de lluvia.

Otro resultado por destacar es que al realizar un aproximado del número de eventos de precipitación, la mayoría está por arriba de 40, excepto en 2019 y 2022. De acuerdo con lo discutido por López, Magaña y Pérez (2022) ha habido un aumento a la vulnerabilidad por lluvias intensas y el riesgo de inundaciones repentinas en el municipio de Guadalajara dado el cambio de uso del suelo y la poca capacidad en la

red de drenaje, respectivamente, y donde año con año se esperan más de 30 eventos de lluvia.

Por otro lado, se observó una clara disminución de los servicios atendidos por parte de cuatro bases de bomberos de la CMPCG a partir de 2017, cuando se realizó una consulta de la obra pública en el municipio y año por año para observar las nuevas obras y su ubicación; a partir de 2017 hubo un incremento de estas obras, muchas localizadas en la parte centro y sur del municipio (Gobierno GDL, 2023); asimismo, a partir de ese mismo año disminuyó el número de eventos de precipitación.

Respecto a la categorización del nivel de inundación, se observa que la mayoría de las colonias tiene un nivel de inundación entre bajo a medio, con unas colonias con rango alto justo donde se ramifica el cauce principal que atraviesa el municipio, por lo que es importante recordar que la inundación es un acontecimiento social, un fenómeno que no muestra una sola cara, sino que está sujeto a múltiples interpretaciones en el marco de una trama sociocultural (Bartolomé, 2006), y que los peligros los construye la misma sociedad; por eso la evaluación de peligro es fundamental para el mapeo del riesgo (Bulti & Abebe, 2020; Maranzoni *et al.*, 2023).

Se trabajó con 3 676 SAI, que al obtener los SiRI corresponden a un total de 63, con 65 CRI y 20 SiCI, los cuales cumplen con los criterios de recurrencia; en el caso de los SiCI, se agregó el criterio de incidencia tanto en domicilio como cruce. De acuerdo con la información más reciente proporcionada por el Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara (IMEPLAN) se manejan 360 puntos de inundación (Ortiz, 2023), que en el año 2023 comenzaron

a nombrar también como sitios recurrentes de inundación, pero a nivel metrópoli. Es así como la identificación de las principales colonias recurrentes de inundación es una base para la prevención de riesgos, pues los criterios para la obtención de dichas colonias y sitios recurrentes están en función de la frecuencia y su altura de inundación significativa. Por otro lado, los sectores que más han sido afectados históricamente son la vía pública, casa habitación y establecimientos de servicio; en este sentido, se coincide con el sector académico e IMEPLAN en cuanto a la urgencia y necesidad de regular el crecimiento urbano en la ZMG (Ortiz, 2023), que contribuya a aminorar el riesgo de inundación no solo en el ámbito metropolitano sino también municipal.

Como parte de la investigación a futuro aún queda mucho por hacer, como un estudio enfocado a los daños directos, ya que la base de datos describe con mayor profundidad la afectación real del servicio atendido, el cual no se abordó en este trabajo.

Conclusiones

Esta investigación se centra en el análisis de la base de datos recopilada durante la atención de emergencias por parte del área operativa de la CMPCG, dentro de la cual está el inventario de inundaciones que contiene los sitios de afectación por inundación (SAI). El análisis geoespacial histórico de las inundaciones en el municipio de Guadalajara se realizó con ayuda de herramientas SIG. Se obtuvo un mapa de categorización por inundación, además de SiRI, CRI y SiCI, entre las cuales están las siguientes zonas: Colon Industrial, Miravalle, Jardines del Bosque, San Carlos y el Dean, cuyas colonias obtuvieron una mayor frecuencia

histórica de inundación y mayor altura de inundación para finalmente obtener los SiCI. A partir de estos resultados, se recomienda dar una mayor vigilancia o, en su caso, brindar alguna solución ante las inundaciones.

Se espera que los resultados de este estudio apoyen respuestas y planes de emergencia, y contribuyan con la cuantificación de daños, generación de sistemas de alerta y con la gestión integral del riesgo. Un área de oportunidad yace sin duda ante la valiosa sistematización de la información, como vincular las alturas de inundación al concepto de periodo de retorno, herramienta indispensable para el diseño de planes de emergencia o diseño de infraestructura hidráulica.

Finalmente, se destaca que dentro de la CMPCG y del área de Gestión Integral de Riesgos se encuentra la Oficialía de Inteligencia, la cual trabaja en la actualización del "Atlas de Riesgo" del municipio de Guadalajara, a fin de contar con una herramienta pertinente y actualizada para tomar decisiones más eficaces y planificar adecuadamente el crecimiento urbano en Guadalajara, apoyo en programas de protección civil y estudios en general. Además, dicha Oficialía realiza un monitoreo constante de fenómenos atmosféricos, geológicos y ambientales, y apoya la transición de un esquema reactivo a uno preventivo.

Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo a través del programa Investigadores e Investigadoras por México. Los autores agradecen a todo el personal de la Coordinación Municipal de Protección Civil de Guadalajara por la

información proporcionada para poder realizar el presente estudio. Un agradecimiento especial al Oficial Bombero Silverio Coronado Campos por crear y administrar la base de datos del inventario de inundaciones. Asimismo, agradecemos a Jocelyn Betsabé Serrano Barragán y a los revisores por los comentarios y sugerencias que han contribuido a mejorar el presente documento.

Referencias

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Varela, J. M. R., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Góngora, P. M. A. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 33-55.
- Avila-Aceves, E., Rocha-Plata, W., Mojardin-Armenta, S., & Rangel-Peraza, J. (2023). Geospatial modelling of floods: A literature review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-20. DOI: 10.1007/s00477-023-02505-1
- Bartolomé, M. A. (2006). Pergamino, la inundación y sus versiones. *Avá. Revista de Antropología*, 9, 132-146. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1690/169014140009.pdf>
- Bulti, D. T., & Abebe, B. G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1293-1302. DOI: 10.1007/s40808-020-00803-z

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). *Comunicado de prensa No. 811-15. Temporada de ciclones tropicales 2015*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional.

Constantino, M., & Dávila, R. (2011). Una aproximación a la vulnerabilidad y la resiliencia ante eventos hidrometeorológicos extremos en México. *Política y Cultura*, 36, 15-44.

Durán, J. de J. F. (2019). Guadalajara, Jalisco: vulnerabilidad a inundaciones. *Geocalli*, 20(40), 78. Recuperado de http://www.geografia.cucsh.udg.mx/sites/default/files/geocalli_40_final_3.pdf

Elkhrachy, I., Pham, Q. B., Costache, R., Mohajane, M., Rahman, K. U., Shahabi, H., Linh, N. T., & Anh, D. T. (2021). Sentinel-1 remote sensing data and hydrologic engineering centres river analysis system two-dimensional integration for flash flood detection and modelling in New Cairo City, Egypt. *Journal of Flood Risk Management*, 14(1):12692

EM-DAT. (2022). *EM-DAT*. Recuperado de <http://www.emdat.be/database>

GacetaUdeG. (2010). *Guadalajara y sus desastres*. Recuperado de <http://www.gaceta.udg.mx/Guadalajara-y-sus-desastres/>

Gobierno GDL. (2023). *Obras Públicas - Control de Obra Pública 2023*. Recuperado de <https://enlinea.guadalajara.gob.mx/obras/obrasPublicas/listadoObras.php>

- Haer, T., Botzen, W. J. W., Van, V., Connor, H., Zavala-hidalgo, J., Eilander, D. M., & Ward, P. J. (2018). Coastal and river flood risk analyses for guiding economically optimal flood adaptation policies: A country-scale study for Mexico. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 376. DOI: 10.6084/m9.figshare.c.4060277
- Herrera, A. del C. V., & Huizar, P. C. (2005). El crecimiento urbano y las características socioeconómicas de la zona metropolitana de Guadalajara. *Carta Económica Regional*, 94(13). DOI: 10.32870/cer.v0i94.5610
- IAM, Instituto de Astronomía y Meteorología. (2023). *Climatología*. Recuperado de <http://iam.cucei.udg.mx/climatologia>
- IFRC, International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2020). *2020 annual report*. Recuperado de https://www.ifrc.org/sites/default/files/2021-09/20210902_AnnualReport_ONLINE.pdf
- Kidson, R., & Richards, K. S. (2005). Flood frequency analysis: Assumptions and alternatives. *Progress in Physical Geography*, 29(3), 392-410. Recuperado de <http://ppg.sagepub.com/content/29/3/392.abstract>
- López, J., & Francés, F. (2013). Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3189-3203. DOI: 10.5194/hess-17-3189-2013

- López, M., Magaña, V., & Pérez, T. (2022). Riesgo de inundaciones urbanas repentinas en la Zona Metropolitana de Guadalajara, México. *Investigaciones Geográficas*, (108), 21. DOI: 10.14350/rig.60547
- Maranzoni, A., Dória, M., & Rizzo, C. (2023). Quantitative flood hazard assessment methods: A review. *Journal of Flood Risk Management*, 16(1). DOI: 10.1111/jfr3.12855
- Merz, B., Dottori, F., Aerts, J. C. J. H., Bates, P., Bertola, M., & Kemter, M. (2019). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Earth & Environment*, 2, 592-609. DOI: 10.1038/s43017-021-00195-3
- Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V. P., Wright, D. B., Villarini, G., Paul, S., Kumar, N., Khedun, C. P., Niyogi, D., Schumann, G., & Stedinger, J. R. (2022). An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(6). DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002164
- Ocampo, O. L., & Vélez-Upegui, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del río Chinchiná. *Revista de Ingeniería. Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58.
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2021). *ONU-Habitat - Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres*. Recuperado de <https://onuhabitat.org.mx/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>

- Ornelas, L. V., Castillo, M. del R., & Salazar, A. (2005). Las inundaciones en la zona metropolitana de Guadalajara. *Carta Económica Regional*, 9. DOI: 10.32870/cer.v0i91.5633
- Ortiz, E. (2023). *Un temporal más, y detectan ocho nuevos puntos de inundación; tres de ellos, de alta prioridad*. Recuperado de <https://udgtv.com/noticias/un-temporal-mas-y-detectan-ocho-nuevos-puntos-de-inundacion-tres-de-ellos-de-alta-prioridad/66989>
- Pistrika, A., Tsakiris, G., & Nalbantis, I. (2014). Flood depth-damage functions for built environment. *Environmental Processes*, 1(4), 553-572. DOI: 10.1007/s40710-014-0038-2
- Salas, M., & Jiménez, P. (2014). *Inundaciones. Serie de Fascículos (Versión el)*. México, DF, México, CENAPRED.
- Salazar, A. G., Juárez, A., & Ramírez, L. L. (2008). *Curvas de intensidad, duración y periodo de retorno como herramienta de análisis*. Recuperado de <http://sincronia.cucsh.udg.mx/salazar.htm>
- Salazar, S. (2013). *Metodología para el análisis y la reducción del riesgo de inundaciones: aplicación en la rambla del pollo (Valencia) usando medidas de "Retención de agua en el territorio"*. València, España: Universitat Politècnica de València.
- Sedatu, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. (2016). *Términos de referencia para la elaboración de atlas de peligros y/o riesgos 2016*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/135433/TR_AR_231016_Pu_blico.pdf

- Shaleen, J., & Lall, U. (2001). Floods in a changing climate: Does the past represent the future? *Water Resources Research*, 37(12):3193-3205. DOI: 10.1029/2001WR000495
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Información histórica*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Torres, I. X., Franco, D., Souza, D., & Lattuada, M. F. (2019). *Resistir a las inundaciones: afectaciones y estragos de "las lluvias" en la Zona Metropolitana de Guadalajara*. Recuperado de <https://www.zonadocs.mx/2019/07/30/resistir-a-las-inundaciones-afectaciones-y-estragos-de-las-lluvias-en-la-zona-metropolitana-de-guadalajara/>
- Vidrio-Sahagún, C. T., & He, J. (2021). Flood hazard estimation under nonstationarity using the particle filter. *Geosciences*, 11(1), 13. DOI: 10.3390/geosciences11010013
- Villarini, G., Smith, J. A., Serinaldi, F., Ntelekos, A. A., & Schwarz, U. (2012). Analyses of extreme flooding in Austria over the period 1951-2006. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1178-1192. DOI: 10.1002/joc.2331
- Vojtek, M., Vojteková, J., & Pham, Q. B. (2021). GIS-based spatial and multi-criteria assessment of riverine flood potential: A case study of the Nitra River Basin, Slovakia. *International Journal of Geo-Information*, 10(9), 578. DOI: 10.3390/ijgi10090578

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-07

Artículos

Aula invertida y el aprendizaje basado en problemas en la enseñanza de la hidrología a estudiantes de ingeniería civil en Cuba, Perú y Mozambique
Flipped classroom and problem-based learning in teaching hydrology to civil engineering students in Cuba, Peru and Mozambique

Maiquel López-Silva¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0946-6160>

Dayma Carmenates-Hernández², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5482-7562>

Gladys Requejo-Pacheco³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4262-1986>

Oscar Brown-Manrique⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3713-3408>

Albi Mujica-Cervantes⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6355-5116>

Fernando Brazao-Tembe⁶, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0447-9594>

Belarmino Guivala⁷, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3101-3060>

¹Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima, Perú,
mlopezs@ucss.edu.pe



²Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima, Perú,
dcarmenates@ucss.edu.pe

³Universidad Católica Sedes Sapientiae, Lima, Perú,
grequejo@ucss.edu.pe

⁴Universidad de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila, Cuba, obrow@unica.cu

⁵Universidad de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila, Cuba, albi@unica.cu

⁶Instituto Superior Politécnico de Gaza, Gaza, Mozambique,
fernando.tembe@ispg.ac.mz

⁷Escola Superior de Desenvolvimento Rural, Universidad Eduardo
Mondlane, Vilankilo, Mozambique, belarmino.j.guivala@uem.mz

Autor para correspondencia: Maiquel López-Silva, mlopezs@ucss.edu.pe

Resumen

En este artículo se desarrolla un nuevo modelo pedagógico del aula invertida (FC) y el aprendizaje basado en problemas (PBL) para la enseñanza de la hidrología a estudiantes de ingeniería civil. La investigación fue aplicada de diseño cuasi experimental. Se aplicaron los métodos pedagógicos por un periodo de 10 años en dos universidades públicas, una de Cuba (UC) y la otra de Mozambique (UM), y una privada en Perú (UP). El instrumento aplicado demostró ser confiable, válido y las pruebas de normalidad demostraron que existen diferencias significativas en el nuevo modelo FC-PBL en comparación con el tradicional. Se probó mayor satisfacción en las habilidades genéricas y grado de aprendizaje

adquirido en los estudiantes de UP, UC, UM de 89.92, 80.12 y 46.14 %, respectivamente. Se concluyó que el nuevo modelo pedagógico FC-PBL proporciona mayores fortalezas para la formación del ingeniero civil en la educación superior del siglo XXI.

Palabras clave: aprendizaje centrado en el estudiante, educación en ingeniería, habilidades de ingeniería, pensamiento crítico, procesos de aprendizaje, resolución de problemas.

Abstract

In this article, a new pedagogical model of the Flipped Classroom (FC) and problem-based learning (PBL) is developed for teaching hydrology to civil engineering students. The research was applied with a quasi-experimental design. The pedagogical methods were applied for a period of 10 years in a public university in Cuba (UC) and Mozambique (UM), and a private one in Peru (UP). The applied instrument proved to be reliable and valid, and the normality tests showed that there are significant differences in the new FC-PBL model compared to the traditional one. Greater satisfaction was demonstrated in the generic skills and degree of learning acquired in the students of UP, UC, UM of 89.92, 80.12 and 46.14 %, respectively. It was concluded that the new FC-PBL pedagogical model provides greater strengths for the training of civil engineers in higher education in the 21st century.

Keywords: Student-centered learning, engineering education, Engineering Skills, critical thinking, Learning processes, problem-solving

Recibido: 04/07/2023

Aceptado: 02/01/2024

Publicado *online*: 11/01/2024

Introducción

La educación superior del siglo XXI se enfrenta a grandes desafíos por las prácticas pedagógicas y el proceso de adaptación e implementación de nuevas tecnologías. Sin embargo, Tunji, Kajimo, Ayodele y Emmanuela (2021) citan que el estilo de enseñanza es el factor más importante que afecta el aprendizaje de los estudiantes. En este sentido, las universidades deben fomentar prácticas pedagógicas innovadoras, para adecuarse a los cambios y retos futuros del desarrollo social, así como predecir los problemas ante las necesidades de la humanidad (Maureira, Vásquez, Garrido, & Olivares, 2020; Sukacké *et al.*, 2022), como es el caso del curso de hidrología en ingeniería civil en donde los estudiantes deben estimar máximas avenidas —producto de los fenómenos meteorológicos— para crear estructuras hidráulicas sostenibles (Sukacké *et al.*, 2022). Por tanto, se les deben proporcionar métodos de enseñanza y aprendizaje cautivadores e integradores para generar las habilidades necesarias para su vida profesional.

La Junta de Acreditación de Ingeniería y Tecnología (ABET) ha destacado cualidades importantes para fomentar mejoras en la calidad educativa: la capacidad de comunicarse eficazmente, y la capacidad de adquirir y aplicar nuevos conocimientos utilizando estrategias de aprendizaje adecuadas (Pejcinovic, 2019; Suárez *et al.*, 2021).

Las habilidades del estudiante universitario del siglo XXI son diversas: digitales, cognitivas avanzadas, ejecutivas y socioemocionales (Mateo *et al.*, 2022). Al respecto, las universidades de Suecia solo emplean profesores con competencias y pedagogía en las disciplinas a dictar, las cuales crean las condiciones para mejorar la calidad de la enseñanza (Măță & Suci, 2011; Ryegård, Apelgren, & Olsson, 2010).

En algunos países de la región de América Latina, la idea de las habilidades del siglo XXI como eje central de los programas curriculares ha tenido una buena recepción, pero en Argentina, Uruguay, Paraguay y Perú se ha mostrado rechazo a dichas habilidades (Mateo *et al.*, 2022).

La educación centrada en el estudiante "aprendizaje basado en problemas" (PBL) es el método pedagógico más diversificado en EUA, que surgió de las malas prácticas de la enseñanza de medicina en Canadá (Dochy, Segers, Van den Bossche, & Gijbels, 2003).

No obstante, han existido diversos resultados empíricos en otras ramas de la ciencia que cubren numerosas habilidades sostenibles (Beer & Mulder, 2020; Carrió & Llerena, 2022; Carrió, Baños, & Rodríguez, 2022). El PBL implementado de forma adecuada permite desarrollar una serie de competencias en el entorno profesional (Gorghiu, Anghel, & Ion, 2015).

Por otro lado, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) promueven la adaptabilidad de nuevas formas de aprendizaje dentro de la universidad, como el aula invertida. El aula invertida es la estrategia que combina variados ambientes de aprendizaje con una amplia base en las TIC (Al, Shamsuddin, & Alzahrani 2020; Bergmann & Sams, 2012; Del Río-Gamero *et al.*, 2022). Sin embargo, los métodos FC

y PBL enfrentan desafíos por su elevado uso de herramientas y TIC para el desarrollo de las actividades.

En Cuba existen escasas investigaciones relacionadas con el FC y PBL; en su mayoría se enfocan al plan de estudio de la carrera de medicina (Alemán, López, Oscar, & Solís, 2008; Sarmiento, Hernández, Esquivel, Gutiérrez, & Rodríguez, 2022). Unas de las posibles causas es el escaso avance de digitalización en relación con otros países en vía de desarrollo (Maloney, 2021), aunque se han planteado estrategias en las carreras de ingeniería, como los proyectos integradores, que permiten la interdisciplinariedad e involucra la investigación científica-tecnológica (Rivero, Murillo, & Ferrer, 2017; Sociedad, Pimentel, Lozano, & Finalé-de-la-Cruz, 2019; Zúñiga, Cruz, Dotres, & Abreu, 2021).

En el Perú existen evidencias científicas de la aplicación del PBL y FC (Chiyón, Palma, & Cazorla, 2011; Baudin *et al.*, 2022; Serrano, Pérez, Puño, & Hurtado, 2023). Al respecto, Vásquez *et al.* (2023), en la aplicación del FC, detectan que el 70 % de la muestra aumentó el nivel de aprendizaje en la experiencia curricular. Del-Savio *et al.* (2023) citan que con la ejecución del PBL en el curso de diseño y construcción virtual de ingeniería civil en la Universidad de Lima se mostró que los estudiantes mejoraron en un 6.13, 7.15 y 3.44 % en cuanto a desarrollo de las competencias, grado de aprendizaje y tratamiento de proyectos, respectivamente.

Mozambique ejecuta la migración hacia las aulas digitales con fuertes esfuerzos porque la población presenta dificultades básicas y económicas. Rhongo y Da-Piedade (2022) demuestran que a pesar de los esfuerzos persisten obstáculos para el acceso a los recursos tecnológicos

y conectividad con Internet. Mendonça, Popov, Frånberg y Cossa (2012), y Campira, Silva y Araújo (2021) señalan otro aspecto: que la infraestructura y la diversificación sociocultural dificultan la enseñanza y aprendizaje del estudiante. Sin embargo, existen actitudes favorables en el sector educativo para integrar nuevas estrategias didácticas.

Por tanto, la investigación tiene como propósito plantear el modelo pedagógico del FC y el PBL para la enseñanza eficaz de la hidrología a estudiantes de ingeniería en universidades de Cuba, Perú y Mozambique.

Materiales y métodos

Metodología

La representación esquemática del modelo FC y el PBL se muestra en la Figura 1. En primer lugar, el estudiante realiza el autoestudio de conceptos, teorías y procesos eventuales mediante los materiales de consultas a través del aula digital desde su hogar. En segundo lugar, en el salón de clase el profesor aplica mayor tiempo al PBL real de la sociedad. En tercer lugar, se amplían los conocimientos con base en los PBL y el desarrollo de proyectos de investigación. En todo su proceso estará presente la identificación del problema hasta la presentación de la solución del mismo.

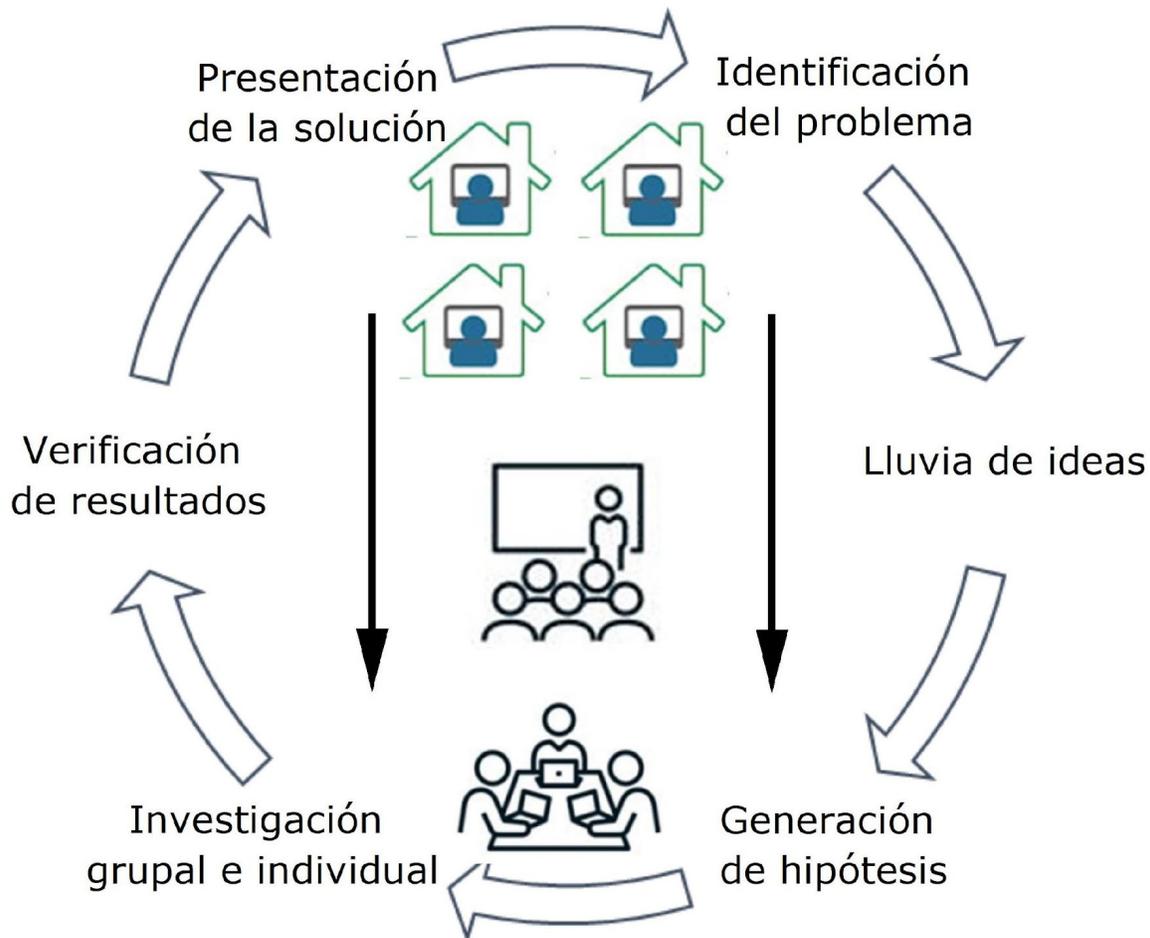


Figura 1. Modelo pedagógico FC-PBL.

La investigación por su tipo y finalidad se aplica con un enfoque cuantitativo que permite describir, procesar y explicar fenómenos en la base de datos cuantitativa (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014). Se utilizó un diseño cuasi experimental con una manipulación deliberada de las variables independientes (FC y PBL) para observar el efecto sobre las variables dependientes (habilidades genéricas e influencia del aprendizaje).

En la aplicación del modelo pedagógico no existió una selección de estudiantes y tampoco una asignación aleatoria, fue para la totalidad de los estudiantes matriculados en el curso de hidrología. Por ello, se han generado tres grupos experimentales UC, UP y UM, que corresponden a una universidad para cada país: Cuba, Perú y Mozambique, respectivamente.

Se aplicó una encuesta digital como instrumento de recopilación de datos para explorar las percepciones de los estudiantes del efecto del modelo pedagógico en el desarrollo de las habilidades genéricas y aprendizaje.

La encuesta en su primera fracción media la percepción de los estudiantes sobre el modelo tradicional y el nuevo modelo pedagógico, con énfasis en las habilidades genéricas. Atendiendo a su contenido, se agruparon en tres grupos: relaciones interpersonales y trabajo grupal (RITG); autonomía y desarrollo personal (ADP); y habilidades relativas a los valores (CRV). En la segunda fracción, la encuesta abarcó la percepción que tenían los estudiantes sobre el nuevo modelo pedagógico FC y PBL, según el grado de mejora en el salón de clases, en el laboratorio y en el desarrollo del proyecto/prácticas de campo.

Por último, el modelo pedagógico FC y PBL se aplicó en estudiantes de universidades públicas y privadas (UC y UM en públicas; UP en privada). La duración del análisis de la investigación fue de 10 años, equivalente a 20 ciclos, con participación de seis profesores y dos colaboradores.

Evaluación y validación del instrumento



Se aplicó el alfa de Cronbach para la confiabilidad del instrumento con rango jerárquico de acuerdo con Taber (2018); mientras que para la validez del instrumento se aplicó el índice de validez de contenido (CVI) (Albaum, 1997; Lawshe, 1975). Además, se utilizó la escala Likert con cinco rangos de clasificación desde muy insatisfecho hasta muy satisfecho.

Se elaboró la investigación bajo un margen de error de 2 % para un nivel de confianza del 95 % y probabilidad del 5 %. Se estimó una muestra de estudiantes a partir de quienes finalizaron el curso de hidrología. Se aplicó la prueba de normalidad de los datos bajo el test estadístico de Kolmogórov-Smirnov y Spearman a partir del *software* IBM SPSS Statistics versión 24.

Resultados

Durante el periodo de investigación, las universidades alcanzaron una matrícula de 1 986 estudiantes, equivalente a la población de estudio. Ello generó una muestra de 95.16, 92.93 y 92.03 % en relación con la población en la universidad en Cuba (UC), en la universidad de Perú y en la universidad en Mozambique (UM), respectivamente.

Los resultados del alfa de Cronbach para cada variable dependiente y sus parámetros indica que la encuesta fue confiable con rango jerárquico entre 0.7 y 0.8, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Pruebas del alfa de Cronbach.

Variable	Parámetros	Alfa de Cronbach
	Relaciones interpersonales y trabajo grupal (RITG)	0.806
	Autonomía y desarrollo personal (ADP)	0.856
	Relativas a los valores (HRV)	0.768
Aprendizaje	Grado de mejora en el salón de clase	0.846
	Grado de mejora en el laboratorio	0.791
	Grado de mejora en el desarrollo de proyecto	0.874

Los resultados de las pruebas de normalidad se indican en la Tabla 2. Según la prueba de Kolmogorov-Smirnov, existe una distribución no normal el P valor < 0.05 . Por tanto, se aplicó la prueba no paramétrica de Spearman, que reflejó un nivel de significancia de 0.000 menor a 0.05, lo cual evidencia que el nuevo modelo pedagógico influye en mejoras del aprendizaje en los estudiantes de las tres universidades.

Tabla 2. Pruebas de normalidad.

Método	Universidad	Kolmogorov-Smirnov			Prueba Spearman	
		Estadístico	gl	Sig.	Correlación de Pearson	Sig.
Tradicional	UC	0.457	452	0.000	0.23	0.000

Método	Universidad	Kolmogorov-Smirnov			Prueba Spearman	
		Estadístico	gl	Sig.	Correlación de Pearson	Sig.
FC-PBL		0.457	452	0.000		
Tradicional	UP	0.448	658	0.000	0.25	0.000
FC-PBL		0.448	658	0.000		
Tradicional	UM	0.413	739	0.000	0.46	0.000
FC-PBL		0.413	739	0.000		

Por otro lado, el índice de validez de contenido mostró un grado de aceptación del nuevo modelo pedagógico FC-PBL en comparación con el método tradicional con valores desde 0.14 hasta 0.72.

Los resultados de la encuesta respecto al desarrollo de habilidades genéricas se muestran en la Figura 2, Figura 3 y Figura 4. En general, los estudiantes plantearon que el nuevo modelo pedagógico FC y PBL contribuyó a desarrollar habilidades genéricas sobre el método tradicional, aunque en la universidad de Mozambique (UM) existe un valor significativo de estudiantes que no están muy satisfecho con el método.

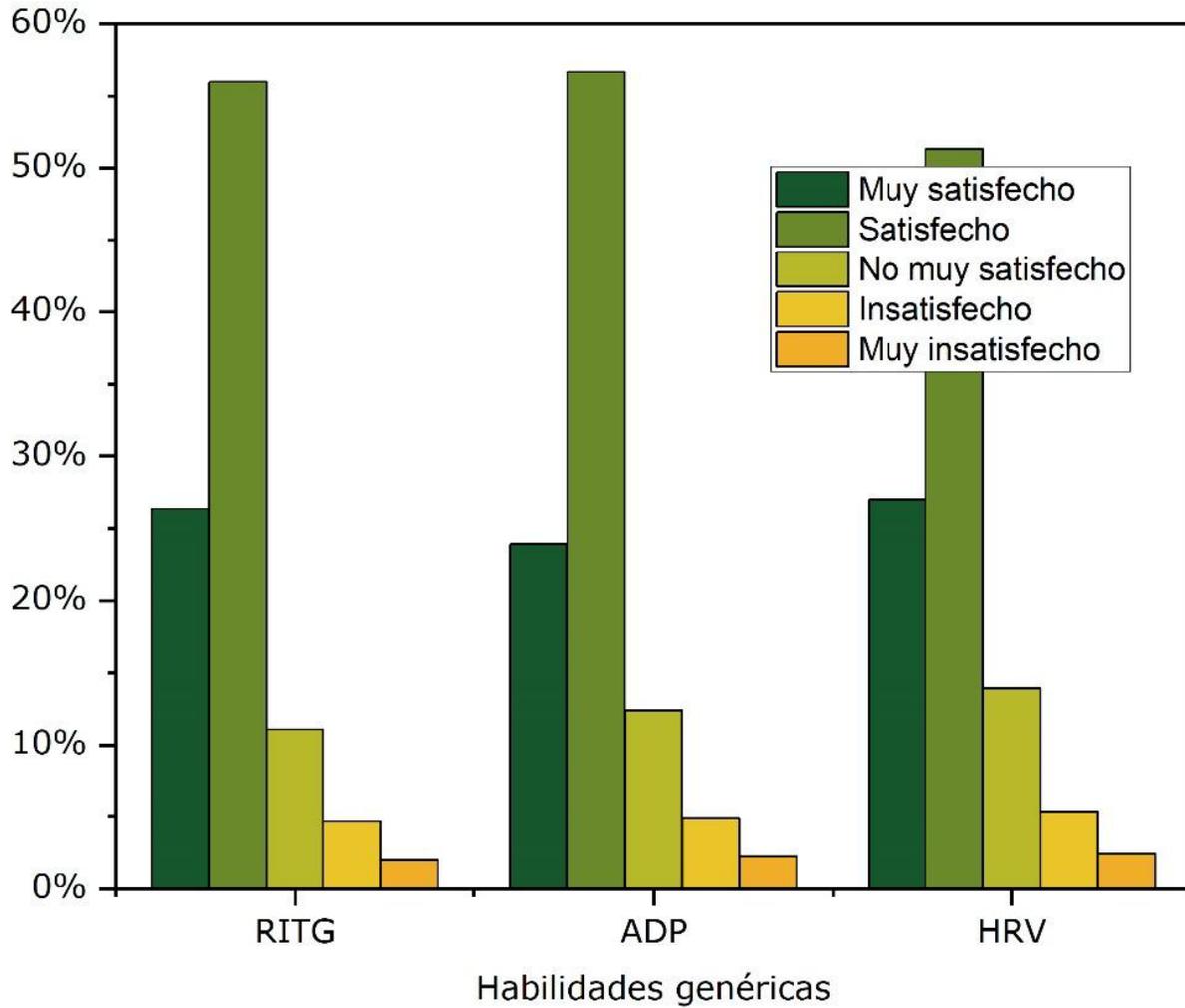


Figura 2. Criterio de los estudiantes de la universidad en Cuba.

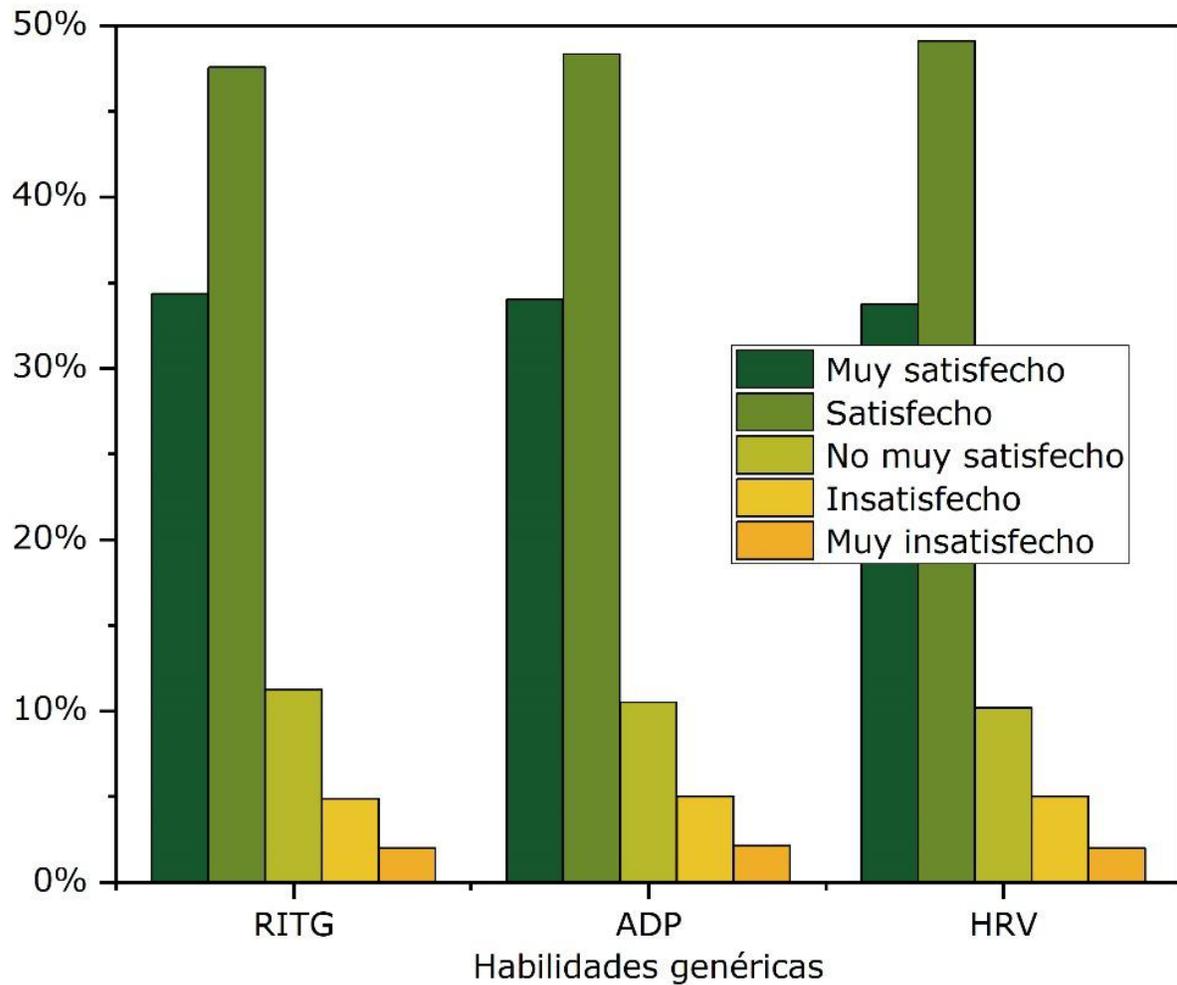


Figura 3. Criterio de los estudiantes de la universidad en Perú.

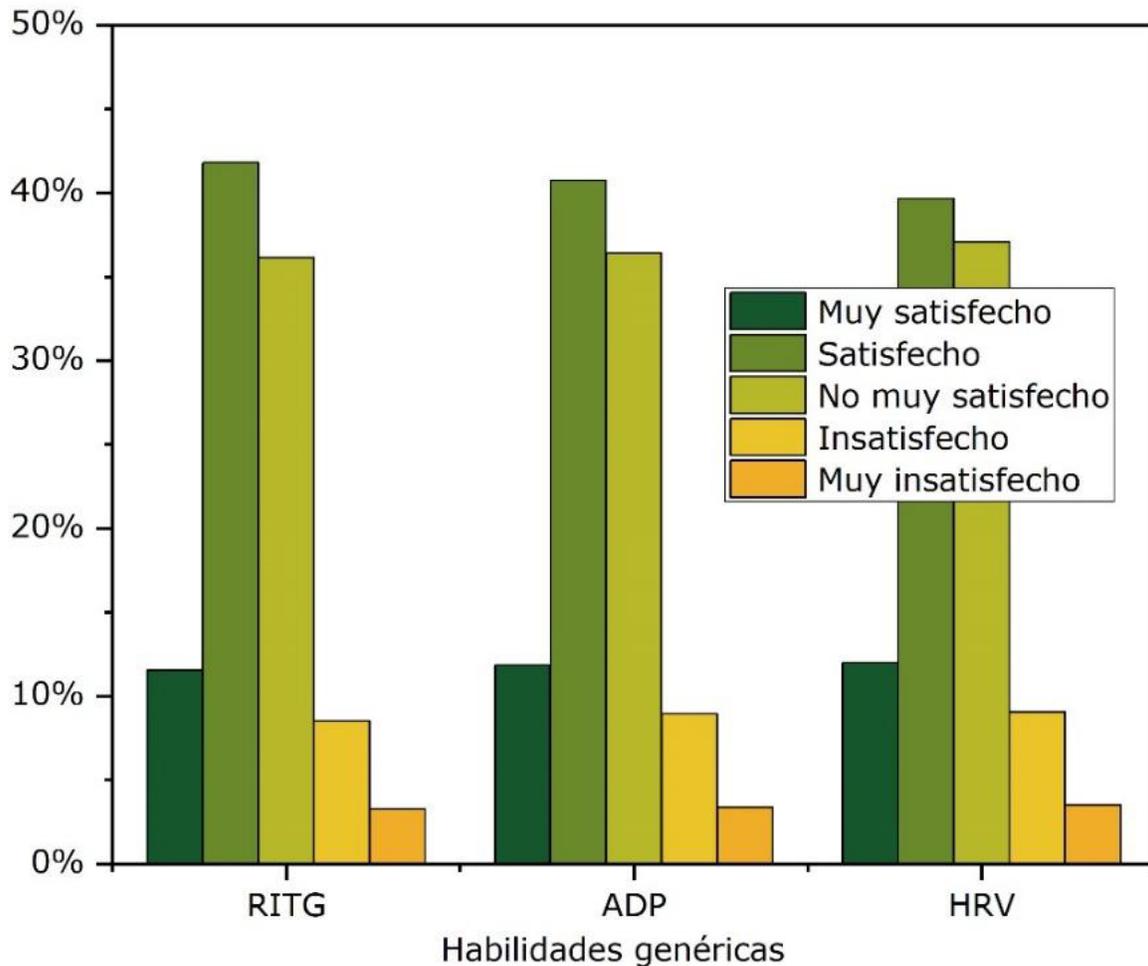


Figura 4. Criterio de los estudiantes de la universidad en Mozambique.

Los resultados del nivel de mejora en el aprendizaje se muestran en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7. Existió un notable grado de mejora en el aprendizaje de los estudiantes en la UC y UP; pero respecto a la UM, existió un menor grado de satisfacción en los tres espacios evaluados.

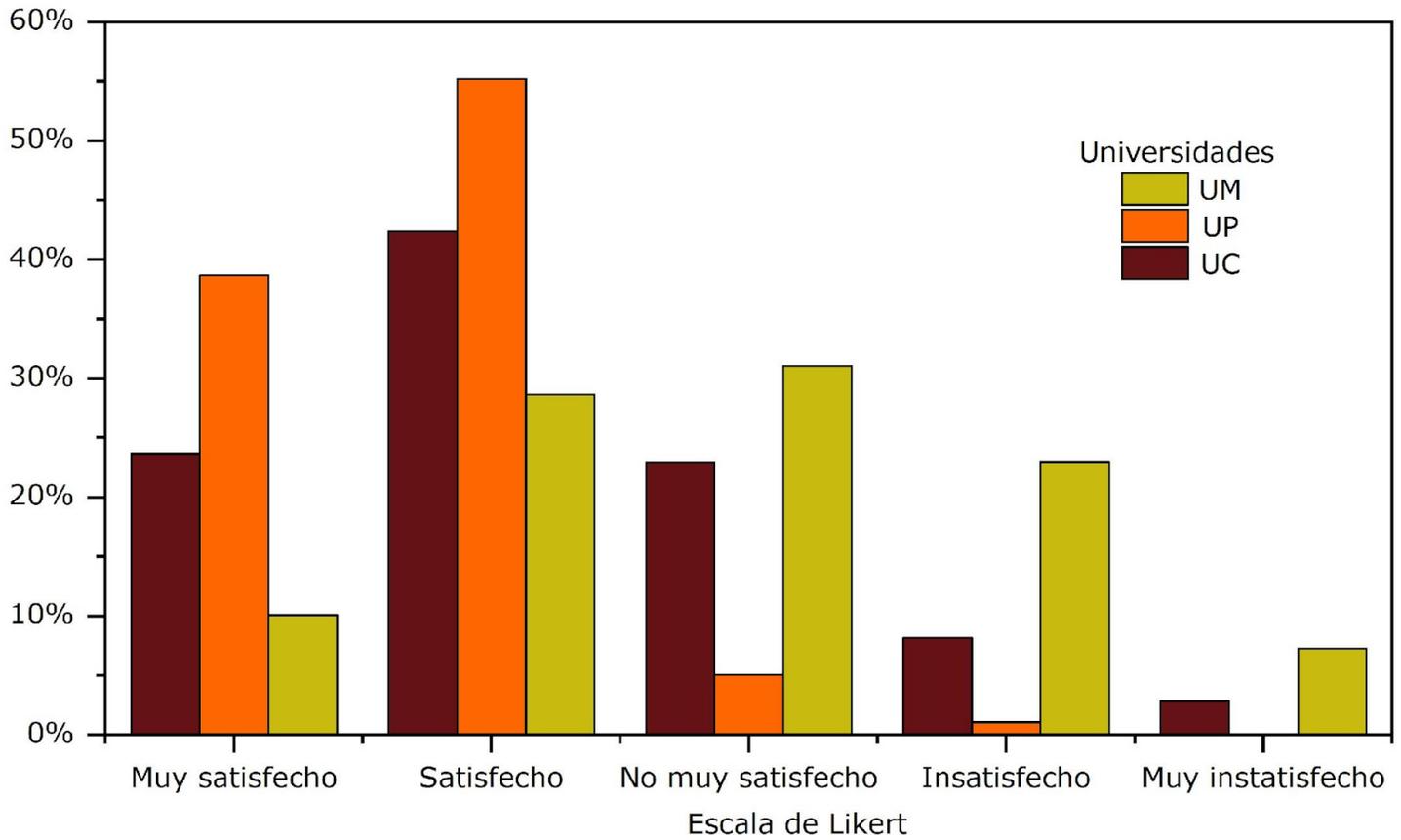


Figura 5. Grado de mejora en el salón de clase.

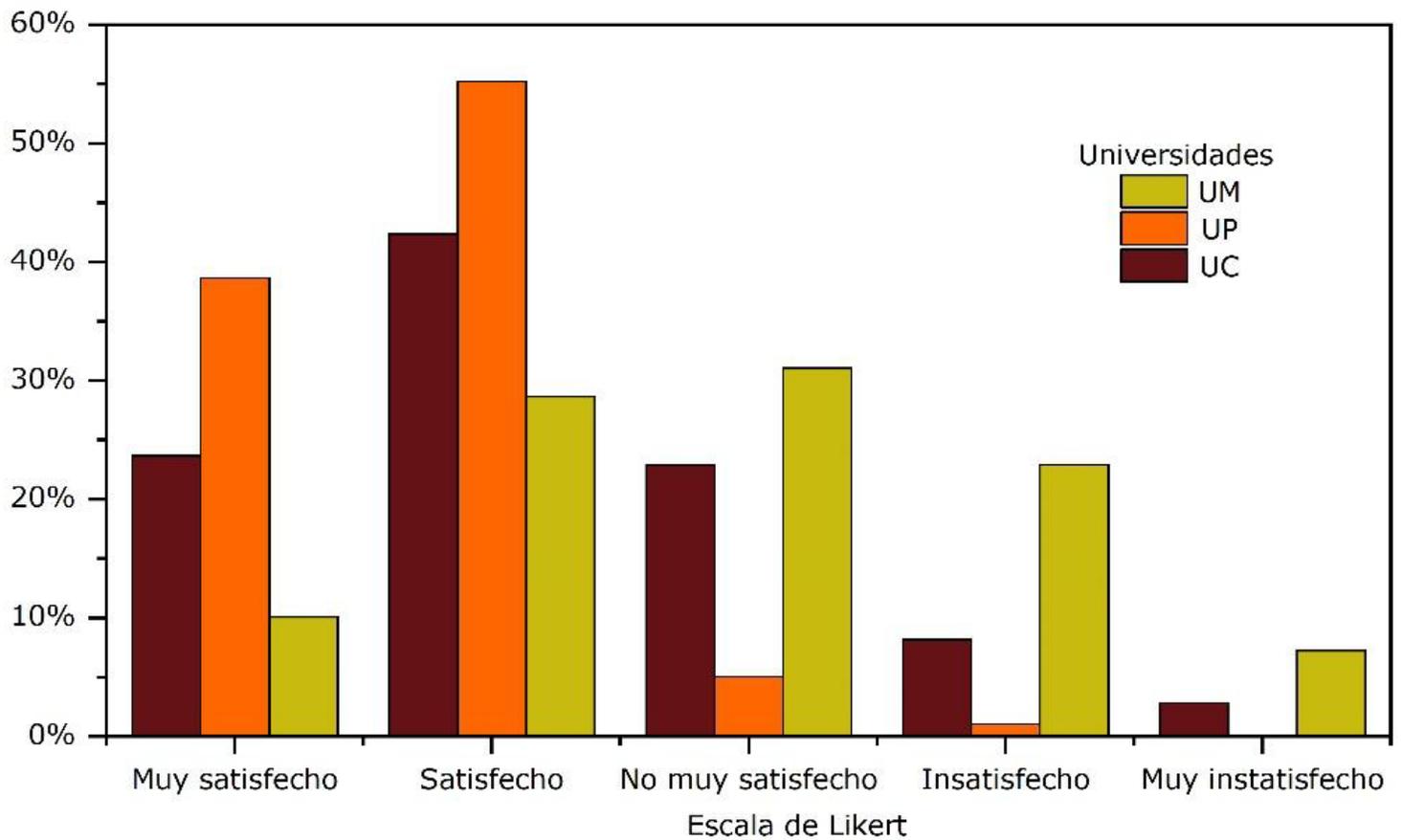


Figura 6. Grado de mejora en el laboratorio.

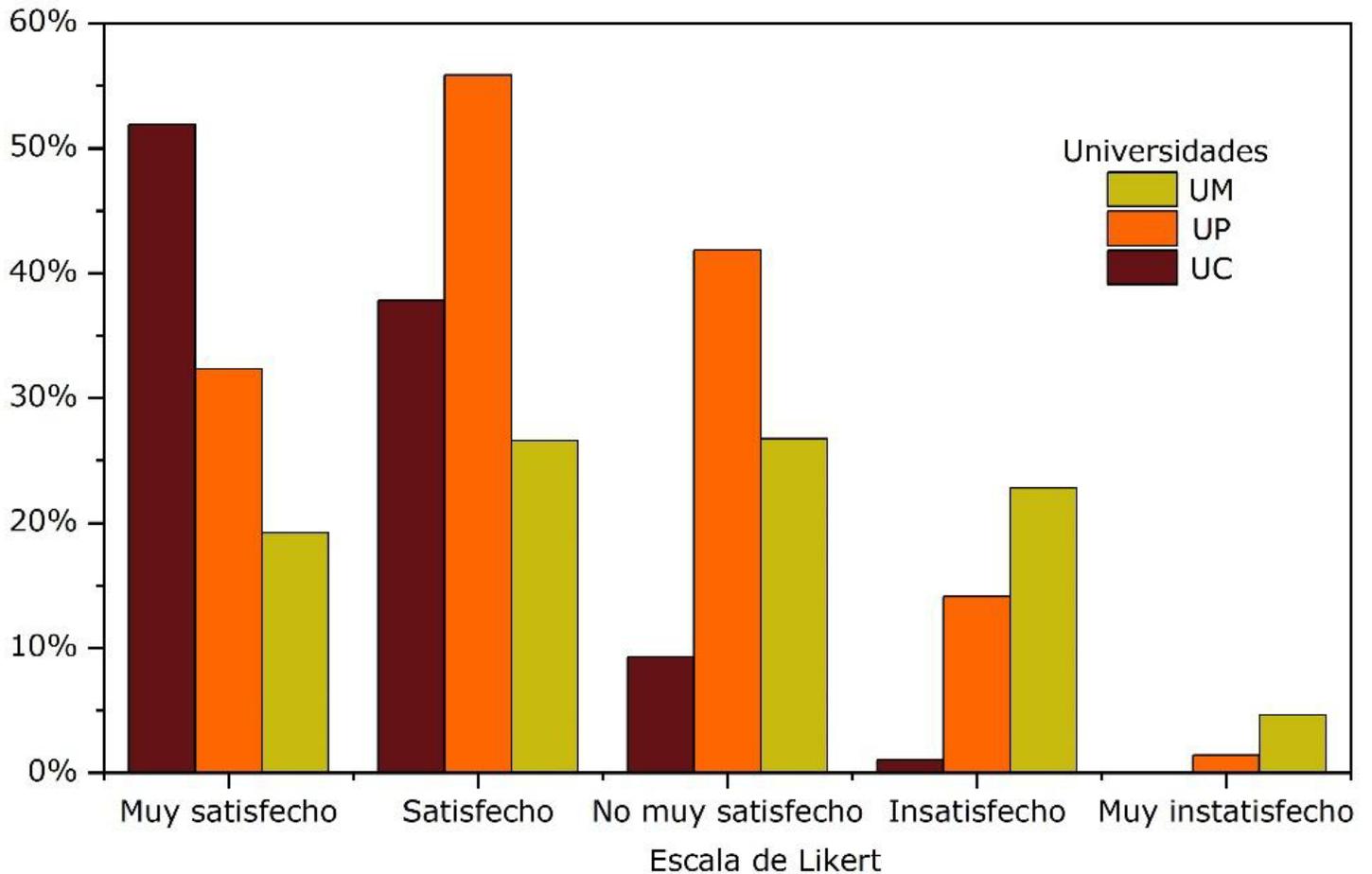


Figura 7. Grado de mejora en el desarrollo de proyecto.

Discusión

El instrumento elaborado según el análisis del alfa de Cronbach es aceptable y con elevada confiabilidad, mientras que los valores del rango jerárquico según clasificación de Taber (2018) son adecuados para su implementación. Por tanto, el instrumento permitió medir las variables dependientes de forma precisa y eficaz.

El nuevo método pedagógico FC-PBL en relación con el método tradicional de enseñanza mostró diferencias significativas, por lo cual se aceptó la hipótesis alternativa (H1) y se rechazó la hipótesis nula (H₀). Además, se demostró de forma estadística que el nuevo método pedagógico FC-PBL influye en el aprendizaje de los estudiantes en el curso de hidrología. El coeficiente de correlación de la prueba de Spearman en UC y UP fue de 0.23 y 0.25, que según Hernández *et al.* (2014) es una correlación positiva débil. Sin embargo, respecto al coeficiente de correlación, en la UM fue de 0.46 más cercano a 0.5, que clasifica como una correlación positiva media. Por lo tanto, se deduce que existe en los estudiantes una escasa apreciación en diferenciar las metodologías y su repercusión en el aprendizaje, cuyas causas podrían ser diversas (Mendonça *et al.*, 2012; Campira *et al.*, 2021).

La encuesta aplicada en las habilidades genéricas arrojó que los estudiantes de la UC y UP alcanzaron de forma más amigable las competencias genéricas en cuanto al modelo FC-PBL propuesto. Los resultados fueron de muy satisfecho y satisfechos, con valores próximos al 82 %; pero en la UM solo alcanzó el 53.05 % y mostró debilidades en los logros de las habilidades.

Se observó que las habilidades asociadas con la autonomía y el desarrollo personal (ADP) son las más influyentes en la UC, con 56.54 %; mientras que en la UP las preponderantes fueron las habilidades relativas a los valores (CRV) con 49.09 %; y en la UM fueron las relaciones interpersonales y trabajo grupal (RITG) con 41.81 %. No existió una homogeneidad de habilidades genéricas entre universidades; las posibles causas podrían ser las diferencias geográficas. No obstante, resalta que

las habilidades destacadas enfatizan los conocimientos en la práctica, y contribuyen a identificar y resolver problemas, así como la capacidad de investigación (Mateo *et al.*, 2022); al respecto, los graduados de ingeniería civil deben solucionar problemas, ser creativos y trabajar en equipo (Del-Savio *et al.*, 2023).

En cuanto a la influencia del nuevo modelo pedagógico FC-PBL en la enseñanza de la hidrología, la UP, como institución privada, resaltó en sus estándares de grado de mejora en el aula, laboratorio y desarrollo de proyectos con el 87.73, 93.86 y 88.19 %, respectivamente, para una escala de Likert entre 3.71 y 4.17. En contraste, la UM, como institución pública, tuvo en su grado de mejora en el aula, laboratorio y desarrollo de proyectos tan solo el 53.86, 38.75 y 45.81 %, respectivamente, para una escala de Likert entre 3.11 y 3.55.

En particular, en la UM se constató debilitada en las condiciones para el aprendizaje; en los laboratorios de cómputo, por ejemplo, había hasta tres estudiantes por computadora. En otras instancias, el acceso a Internet es débil con velocidad de solo 6.1 Mbit/segundo, lo que dificulta el aprendizaje de los estudiantes. Estas condiciones no permiten aplicar de forma eficaz el modelo pedagógico FC-PBL para obtener y procesar la información desde las fuentes hidroidformáticas, o en el propio uso del *software*. En general, el 61.25 % de los estudiantes indica su insatisfacción por los bajos recursos tecnológicos y mala conectividad a Internet (Rhongo & Da-Piedade, 2022); en un estudio similar en Mozambique se alcanzó un grado de insatisfacción del 83 %.

Otros factores que contribuyeron a resultados de insatisfacción fueron la infraestructura, el equipamiento, el mobiliario y los materiales

didácticos. En concordancia con Mendonça *et al.* (2012) y Campira *et al.* (2021), la infraestructura y sus componentes internos son factores básicos para la enseñanza y el aprendizaje en el sistema de enseñanza. En el mismo contexto, diversos investigadores han demostrado que el uso de tecnologías brinda nuevas oportunidades para ampliar los métodos FC-PBL (Campillo & Miralles, 2021; Duan *et al.*, 2021; Seibert, Uhlenbrook, & Wagener, 2013).

Durante la investigación en los estudiantes de UM, se encontró que preocupación se diversificaba en condiciones psicológicas, socioeconómicas y geográficas.

Un hallazgo importante fue la variable de aprendizaje de los estudiantes en la UC en las secciones de desarrollo de proyecto de investigación y prácticas de campo: 90 % estaba satisfecho y muy satisfecho para una escala de Likert de 4.41. Los posibles resultados en la UC son producto del perfeccionamiento de los planes de estudio de las carreras de ingeniería en Cuba. Como factores significativos se tienen la integración de asignaturas e inserción de proyectos integradores en el fortalecimiento de las habilidades, aprendizaje e investigación interdisciplinaria (Rivero *et al.*, 2017). En otros aspectos, desde el plan de estudio se reconocen y promueven las empresas estatales dentro de su modelo de gestión, a través de la relación universidad-empresa. Esto posibilita el intercambio directo de los estudiantes en la identificación de los problemas y posibles soluciones en las empresas productivas, lo cual genera una formación de perfil amplio y ambiente motivacional en los estudiantes (Sociedad *et al.*, 2019).

La efectividad del enfoque pedagógico FC-PBL demostró contribuir a la entrega de conocimientos y contenidos en la educación superior (Forcael *et al.*, 2014; Salas, Segundo, Álvarez, Arellano, & Pérez, 2014). Sin embargo, para su implementación es necesario un grupo de herramientas y sistema TIC para alcanzar los estándares internacionales de educación (Cao *et al.*, 2023; Dehghan, Horan, & Frome, 2022; Doo & Kim, 2023; Karabulut, Jaramillo, & Jahren, 2018; Wang, 2020). La hidrología como ciencia interdisciplinaria requiere un alto nivel tecnológico y, a su vez, induce al estudiante a necesitar un mayor nivel de conocimiento, y pensamiento matemático y computacional (Shen, Chen, & Laloy, 2021).

En general, la investigación muestra una elevada correspondencia con la obtenida por Bes *et al.* (2023), quienes enfatizan que el PBL permite que los estudiantes adquieran habilidades transversales, como comunicación efectiva, trabajo en equipo y liderazgo. Además, el propio autor señaló mejoras en la integración de conocimientos, que repercutió en un aumento eficiente de las calificaciones de los estudiantes.

Como hallazgo significativo se apreció que la UM y la UP impulsan más los temas de hidrología superficial, y que la UC promueve la hidrología superficial y subterránea (a partir de las diferentes formas de organización del diseño curricular y el sílabo del curso). Las causas pueden ser condiciones geográficas y contextos climáticos de cada país, pero este aspecto no visualiza una preparación internacional del ingeniero civil.

Conclusiones

Se elaboró un instrumento eficiente con elevada confiabilidad y validez que permitió conocer la efectividad de la aplicación del nuevo modelo pedagógico del aula invertida (FC) y el aprendizaje basado en problemas (PBL). Se clasificó como legítimo para su aplicación en países que poseen distintas condiciones geográficas, sistema educativo, condiciones de interculturalidad, desarrollo y cohesión social.

El nuevo modelo pedagógico utilizando el aula invertida y el aprendizaje basado en problemas en la enseñanza de la hidrología alcanzó mayores expectativas de aceptación en los estudiantes universitarios en comparación con el método tradicional según los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Spearman.

Los estudiantes de la universidad en Perú mostraron el mejor comportamiento de satisfacción con el nuevo modelo pedagógico FC-PBL que alcanzó el 89.92 % del total; en relación con los estudiantes de la universidad de Cuba, el 80.12 %; y en los estudiantes de la universidad de Mozambique fue del 46.14 %. Sin embargo, para una óptima aplicación del nuevo modelo es imprescindible disminuir las brechas digitales en las universidades con menores recursos financieros. Asimismo, se requiere de docentes con habilidades y rigurosos conocimientos de la ciencia, y de herramientas y tecnologías para llevar a cabo las actividades.

Un hallazgo significativo fue que los métodos pedagógicos del AI y del PBL aplicados de forma conjunta presentaron mayor efectividad del aprendizaje en los estudiantes que cuando se analizan de forma aislada. En el transcurso de la investigación se visualizó que el nuevo modelo

pedagógico promueve el aprendizaje permanente con perspectivas de solución de problemas locales y globales que incluyen diferentes habilidades básicas, y desde el diseño de ingeniería hasta la responsabilidad y ética profesional. Por tanto, en respuesta a la conclusión, para el futuro se debería ampliar el instrumento a las materias de ciencias de la tierra y evaluar el impacto de forma interdisciplinaria.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo de las instituciones involucradas y de los distintos colaboradores para el desarrollo del proyecto de investigación.

Referencias

- Albaum, G. (1997). The likert scale revisited. *International Journal of Market Research*, 39(2), 1-21. DOI: 10.1177/147078539703900202
- Alemán, E. C., López, A. N., Oscar, J., & Solís, M. (2008). Problem-based learning in materials and manufacturing engineering education according to the Itesm-2015. *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, México. Recuperado de <https://somim.org.mx/memorias-somim/>
- Al, S. H., Shamsuddin, A., & Alzahrani, A. I. (2020). A flipped classroom model in higher education: A review of the evidence across disciplines. *Educational Technology Research and Development*, 68(3), 1017-1051. DOI: 10.1007/S11423-019-09718-8/METRICS

- Baudin, P. V., Sacksteder, R. E., Worthington, A. K., Voitiuk, K., Ly, V. T., Hoffman, R. N., Elliott, M. A. T., Parks, D. F., Ward, R., Torres-Montoya, S., Amend, F., Montellano-Duran, N., Vargas, P. A., Martinez, G., Ramirez, S. M., Alvarado-Arnez, L. E., Ehrlich, D., Rosen, Y. M., Breevoort, A., Mostajo-Radji, M. A. (2022). Cloud-controlled microscopy enables remote project-based biology education in underserved Latinx communities. *Heliyon*, 8(11). DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11596
- Beer, P., & Mulder, R. H. (2020). The effects of technological developments on work and their implications for continuous vocational education and training: A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 11, 535119. DOI: 10.3389/FPSYG.2020.00918/BIBTEX
- Bergmann, J., & Sams, A. (2012). *Flip your classroom: Reach every student in every class every day*. Washington, DC, USA: International Society for Technology in Education.
- Bes, M. A., Mendoza, R. J. A., Ferrer, P. E., Iborra, C. A., Zuriaga, A. E., & Luján, F. M. J. (2023). Integration of project-based learning (PjBL) methodology in the course "Bioprocesses Applied to the Environment". *Education Sciences*, 13(6). DOI: 10.3390/educsci13060570
- Campillo, F. J. M., & Miralles, M. P. (2021). Effectiveness of the flipped classroom model on students' self-reported motivation and learning during the COVID-19 pandemic. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2021 8:1, 8(1), 1-9. DOI: 10.1057/s41599-021-00860-4

- Campira, P. F., Silva, A. L., & Araújo, A. M. (2021). Satisfacción académica: un estudio cualitativo con estudiantes universitarios de Mozambique. *Educação & Formação*, 6(3), 2021. DOI: 10.25053/REDUFOR.V6I2.4913
- Cao, Q., Seow, C. K., Lim, L. H. I., Keoh, S. L., Dale, V., Honeychurch, S., Tasler, N., & Bremner, D. (2023). Learners' differences in blended learner-centric approach for a common programming subject. *International Journal of Information and Education Technology*, 13(6), 906-913. DOI: 10.18178/IJIET.2023.13.6.1886
- Carrió, L. M., & Llerena, B. M. (2022). Exploring innovative strategies in problem-based learning to contribute to sustainable development: A case study. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 24(9), 159-177. DOI: 10.1108/IJSHE-07-2021-0296
- Carrió, M., Baños, J. E., & Rodríguez, G. (2022). Comparison of the effect of two hybrid models of problem-based learning implementation on the development of transversal and research skills and the learning experience. *Frontiers in Education*, 7, 875860. DOI: 10.3389/FEDUC.2022.875860/BIBTEX
- Chiyón, I., Palma, M., & Cazorla, A. (2011). An approach of the European higher education framework to the management of higher education at university level in Peru. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 15, 586-591. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.03.145
- Dehghan, S., Horan, E. M., & Frome, G. (2022). Investigating the impact of the flipped classroom on student learning and enjoyment in an organic chemistry course. *Journal of Chemical Education*, 99(7), 2512-2519. DOI: 10.1021/acs.jchemed.1c01104

- Del-Savio, A. A., Carrasco, L. Z., Nakamatsu, E. C., Velarde, K. G., Martinez-Alonso, W., & Fischer, M. (2023). Applying project-based learning (PBL) for teaching virtual design construction (VDC). *International Journal of Engineering Pedagogy*, 13(2), 64-85. DOI: 10.3991/IJEP.V13I2.35877
- Dochy, F., Segers, M., Van den Bossche, P., & Gijbels, D. (2003). Effects of problem-based learning: A meta-analysis. *Learning and Instruction*, 13(5), 533-568. DOI: 10.1016/S0959-4752(02)00025-7
- Doo, W., & Kim, H. (2023). Simultaneous deep clustering and feature selection via K-concrete autoencoder. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1, 1-17. DOI: 10.1109/TKDE.2023.3323580
- Duan, W., Maskey, S., Chaffe, P. L. B., Luo, P., He, B., Wu, Y., & Hou, J. (2021). Recent advancement in remote sensing technology for hydrology analysis and water resources management. *Remote Sensing*, 13(6), 1097. DOI: 10.3390/RS13061097
- Forcael, E., González, V., Orozco, F., Opazo, A., Suazo, Á., & Aránguiz, P. (2014). Application of problem-based learning to teaching the critical path method. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 141(3), 04014016. DOI: 10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000236
- Gorghiu, G., Anghel, G. A., & Ion, R.-M. (2015). Students' perception related to a responsible research and innovation demarche. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 180, 600-605. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.02.166

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Recuperado de <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Karabulut, I. A., Jaramillo, C. N., & Jahren, C. T. (2018). A systematic review of research on the flipped learning method in engineering education. *British Journal of Educational Technology*, 49(3), 398-411. DOI: 10.1111/bjet.12548
- Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity1. *Personnel Psychology*, 28(4), 563-575. DOI: 10.1111/J.1744-6570.1975.TB01393.X
- Maloney, W. K. (2021). Exploring new literacies: A case study on technology and teacher development in Cuban primary schools. *Journal of Media Literacy Education Pre-Prints*. Recuperado de <https://digitalcommons.uri.edu/jmle-preprints/12>
- Măță, L., & Suci, A. I. (2011). Curricular innovative model focused on developing pedagogical competences of teachers of Language and communication. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 12, 274-282. DOI: 10.1016/J.SBSPRO.2011.02.036
- Mateo, B. D. M. M., Lim, J. R., Pellicer, I. C., López, E., Rodríguez, H., López, R., Margo-Mazo, C., Andrea, V. G., Quesada, A. A. V., Brooks, Y. S., Álvarez, X., Ramos, Y., Rivas, A., Barrenechea, I., Brãzo, V., Ndebele, V., Nathan, D., & Groot, B. (2022). *El poder del currículo para transformar la educación: cómo los sistemas educativos incorporan las habilidades del siglo XXI para preparar a los estudiantes ante los desafíos actuales*. DOI: 10.18235/0004360

- Maureira, C. O., Vásquez, A. M., Garrido, V. F., & Olivares, S. M. J. (2020). Evaluación y coevaluación de aprendizajes en blended learning en educación superior. *Alteridad*, 15(2), 174-189. DOI: 10.17163/alt.v15n2.2020.04
- Mendonça, M., Popov, O., Frånberg, G. M., & Cossa, E. (2012). Introducing a student-centred learning approach in current curriculum reform in Mozambican higher education. *Education Inquiry*, 3(1), 37-48. DOI: 10.3402/EDUI.V3I1.22012
- Pejcinovic, B. (2019). *Design of rubrics for student outcomes in 2019-2020 ABET criteria*. Accepted for the 43rd International Convention on Information and Communication Technology. Electronics and Microelectronics (MIPRO). Recuperado de https://pdxscholar.library.pdx.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1562&context=ece_fac
- Rhongo, D., & Da-Piedade, B. (2022). E-teaching in higher education: An analysis of teachers' challenges facing e-learning in Mozambique. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 389 LNNS, 403-414. DOI: 10.1007/978-3-030-93904-5_41/COVER
- Del Río-Gamero, B., Santiago, D.E., Schallenberg-Rodríguez, J. & Melián-Martel, N. (2022). Does the use of videos in flipped classrooms in engineering labs improve student performance?. *Educ. Sci*, 12. DOI: 10.3390/educsci12110735

- Rivero, H. M., Murillo, C. G., & Ferrer, S. Y. (2017). Proyecto integrador: una herramienta metodológica en la educación superior. *Didáctica y Educación*, 8(1), 241-250. Recuperado de <https://revistas.ult.edu.cu/index.php/didascalia/article/view/602/601>
- Ryegård, Å., Apelgren, K., & Olsson, T. (eds.) (2010). *A Swedish perspective on pedagogical competence (NSHU-rapport)*. Uppsala, Swedish: Division for Development of Teaching and Learning, Uppsala University. Recuperado de https://mp.uu.se/documents/432512/1163536/NSHU+Eng_inlaga%5B1%5D.pdf/353a7746-fd1a-678a-f0f9-8cffe89036ad
- Salas, J. A. A., Segundo, J., Álvarez, C., Arellano, J. C., & Pérez, A. A. (2014). Evaluation of the use of two teaching techniques in engineering. *International Journal of Engineering Pedagogy (IJEP)*, 4(3), 4-10. DOI: 10.3991/IJEP.V4I3.3287
- Sarmiento, L. L., Hernández, K. C. G., Esquivel, G. de J. P., Gutiérrez, R. A., & Rodríguez, R. F. (2022). Estrategia de superación profesional para potenciar habilidades pedagógicas profesionales en el tutor de Medicina General Integral. *Revista Cubana de Educación Superior*, 41(número especial 2), 1-12. Recuperado de <https://revistas.uh.cu/rces/article/view/25>
- Seibert, J., Uhlenbrook, S., & Wagener, T. (2013). Preface hydrology education in a changing world. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 1393-1399. DOI: 10.5194/hess-17-1393-2013

- Serrano, R. R., Pérez, G. E., Puño, Q. L., & Hurtado, M. A. (2023). Quality and equity in the Peruvian education system: Do they progress similarly? *International Journal of Educational Research*, 119. DOI: 10.1016/j.ijer.2023.102183
- Shen, C., Chen, X., & Laloy, E. (2021). *Editorial: Broadening the use of machine learning in hydrology*. DOI: 10.3389/frwa.2021.681023
- Sociedad, U. Y., De, M., Pimentel, L. A., Lozano, L. T., & Finalé-de-la-Cruz, L. (2019). Planes de estudio E en la educación superior cubana: una mirada desde la educación continua. *Universidad y Sociedad*, 11(2), 364-371. Recuperado de <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1200>
- Suárez, F., Mosquera-Feijóo, J. C., Chiyón, I. & Alberti, M. G. (2021). Flipped Learning in Engineering Modules Is More Than Watching Videos: The Development of Personal and Professional Skills. *Sustainability*, 13(21), 12290. DOI: 10.3390/su132112290
- Sukacké, V., Guerra, A. O. P. de C., Ellinger, D., Carlos, V., Petroniené, S., Gaižiūnienė, L., Blanch, S., Marbà-Tallada, A., & Brose, A. (2022). Towards active evidence-based learning in engineering education: A systematic literature review of PBL, PjBL, and CBL. *Sustainability*, 14(21), 13955. DOI: 10.3390/su142113955
- Taber, K. S. (2018). The use of cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. *Research in Science Education*, 48(6), 1273-1296. DOI: 10.1007/S11165-016-9602-2/TABLES/1

- Tunji, O. P. P. F., Kajimo, S. K., Ayodele, T. O., & Emmanuel, K. Z. (2021). Factors affecting students' learning in civil engineering measurement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 654(1). DOI: 10.1088/1755-1315/654/1/012033
- Vásquez, A. W., Zuloaga, C. J. F., Díaz, P. M. A., Lau, H. E. M., Chayán, C. A., & Tineo, H. R. P. (2023). Aplicación del Flipped Classroom para el logro del aprendizaje significativo. *Human Review. International Humanities Review. Revista Internacional de Humanidades*, 21(1), 83-95. DOI: 10.37467/REHUMAN.V21.5034
- Wang, Y. H. (2020). Design-based research on integrating learning technology tools into higher education classes to achieve active learning. *Computers & Education*, 156, 103935. DOI: 10.1016/J.COMPEDU.2020.103935
- Zúñiga, I. L. M., Cruz, C. M. A., Dotres, Z. S., & Abreu, M. L. E. (2021). Oportunidades del aprendizaje basado en proyectos (ABP) para la pedagogía profesional en la Universidad de Holguín, Cuba. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 38, 65-79. DOI: 10.5377/farem.v0i38.11943

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-08

Artículos

Contaminación de acuíferos y eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales en centros urbanos de Itapúa, Paraguay

Aquifer contamination and efficiency of wastewater treatment plants in urban centers of Itapúa, Paraguay

Alicia Raquel Eisenkölbl¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9082-7973>

Rafaela Laino-Guanes², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3045-5108>

Christian Vogt-Penzkofer³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6683-4417>

Antonio Benítez-Cañiza⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5591-7375>

¹Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Itapúa, Paraguay, aeisenkolbl1@gmail.com

²Centro de Investigación del Chaco Americano, Paraguay, rafilaino@gmail.com

³Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, cvogt@hotmail.de

⁴Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Paraguay, antoniobenitez25@gmail.com

Autora para correspondencia: Alicia Raquel Eisenkölbl,
aeisenkolbl1@gmail.com

Resumen

La investigación analiza la calidad del agua subterránea y la eficacia del funcionamiento de dos plantas de tratamiento de efluentes domiciliarios en dos centros urbanos de Paraguay, así como la presencia de metales pesados en lodos residuales de ambas plantas de tratamiento. Para analizar la calidad del agua subterránea se recabaron datos de 59 muestreos de agua de 17 pozos profundos obtenidos en un periodo de 10 años entre 2006 y 2016. Para la evaluación del funcionamiento de las plantas de tratamiento se determinó la calidad de los efluentes luego del proceso de depuración. En los lodos generados en ambas plantas se analizó la presencia de metales pesados (Pb, Cr total, Cd y Hg). Los resultados obtenidos se contrastaron con legislaciones nacionales e internacionales vigentes. Los datos cuantitativos se procesaron estadísticamente mediante análisis de varianza y contraste de medias (test de Duncan) con margen de error de 5 %. Los principales resultados indican contaminación microbiológica del agua subterránea (acuífero Guaraní). Sin embargo, los parámetros físico-químicos analizados estaban dentro de los rangos establecidos por las normativas vigentes. Se identificó una inadecuada gestión en la planta de tratamiento de aguas residuales en uno de los centros urbanos (Hohenau). Se detectó presencia de Pb, Cr y Hg, a pesar de que las concentraciones se mantuvieron dentro de los rangos permisibles. Para salvaguardar la salud pública y el

ambiente tanto a nivel local como regional es imperativo aplicar plenamente el marco legal y la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Palabras clave: recursos hídricos, calidad de agua, planta de tratamiento de aguas residuales domiciliarias, gobernabilidad del agua, sustentabilidad de recursos hídricos.

Abstract

The research analyzes groundwater quality and the efficiency of the operation of household effluent treatment plants in two urban centers in Paraguay, as well as the presence of heavy metals in waste sludge from both treatment plants. To analyze groundwater quality, data was collected from 59 water samples from 17 deep wells obtained over a 10-year period between 2006 and 2016. The quality of the effluents was determined after the purification process. The sludge generated in both plants was analyzed for the presence of heavy metals (Pb, total Cr, Cd and Hg). The results obtained were compared with current national and international legislation. Quantitative data was statistically processed by analysis of variance and contrast of means (Duncan's test) with a 5 % margin of error. The main results indicate microbiological contamination of groundwater (Guarani aquifer); however, the physical-chemical parameters analyzed were within the ranges established by current regulations. Inadequate management of the wastewater treatment plant in one of the urban centers (Hohenau) was identified. The presence of Pb, Cr and Hg was detected, even though the concentrations remained within the permissible ranges. To safeguard public health and the environment,

both locally and regionally, it is imperative to fully enforce the legal framework and the implementation of integrated water resources management.

Keywords: Water resources, water quality, household wastewater treatment plant, sustainability of water resources.

Recibido: 13/09/2022

Aceptado: 12/01/2024

Publicado *online*: 19/01/2024

Introducción

Los acuíferos son fuentes de aguas subterráneas esenciales para la vida y el funcionamiento de los ecosistemas; aportan agua a los ríos, lagos, manglares y pantanos; son indispensables para la sobrevivencia de los bosques en regiones de clima seco o tropical; en muchas partes del mundo abastecen a las ciudades y a los campos; además sirven de insumo para diversas actividades económicas (Hirata, Vieira, Susko, Villar, & Marcellini, 2019).

El acuífero Guaraní es el tercer reservorio más grande de aguas continentales subterráneas del mundo. Se extiende por partes del subsuelo de Paraguay, Argentina, Brasil y Uruguay; con una superficie total de 1 084 063 km², se encuentra enteramente en la cuenca del Río de la Plata. El agua que se infiltra en esta cuenca genera la mayor recarga de dicho acuífero (García & Faggioli, 2018; Zarrilli, 2018). Además del acuífero Guaraní y otros acuíferos importantes (Patiño e Yrendá), el

Paraguay también se caracteriza por una compleja red hídrica que define la importancia estratégica que constituye para el desarrollo del Paraguay la gestión integrada de los recursos hídricos transfronterizos (CIC, 2004).

A pesar de la riqueza hídrica que posee el Paraguay tanto superficial como subterránea, el acceso a servicios básicos no es equitativo en el país. Además, en las áreas urbanas no se cumplen con los estándares de saneamiento requeridos. Por ejemplo, ante la falta del servicio de alcantarillado y saneamiento, gran parte de las aguas domiciliarias y de efluentes industriales se vierten de forma directa en las calles o en los cursos hídricos, lo cual genera consecuencias ambientales adversas (MOPC, 2018). Otro problema recurrente en la gestión del recurso hídrico en el país es la falta de información y actualización sobre la calidad del agua tanto superficial como subterránea. Además de ello, tampoco existe información (o es muy escasa) sobre la calidad del agua de los efluentes domiciliarios que son vertidos a los cauces hídricos.

Por estas razones, en este trabajo se presentan datos de calidad del agua desde su origen (acuífero) hasta su depuración luego ser utilizada y sometida al proceso de tratamiento de aguas residuales. Se analizan parámetros microbiológicos y físico-químicos del agua en dos centros urbanos, con el propósito de generar información que aporte al conocimiento de la calidad y del manejo de los recursos hídricos del Paraguay. Los objetivos de este estudio fueron analizar la calidad del agua subterránea de los pozos que abastecen a dos centros urbanos de Itapúa, medir la eficiencia del funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales de ambas ciudades e identificar la presencia de metales pesados en lodos residuales de ambas plantas.

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos microcuencas que forman parte de la gran cuenca del río Paraná. Ambas microcuencas están ubicadas en el departamento de Itapúa, Paraguay: la microcuenca del arroyo Abbeg, que drena sus aguas al arroyo Itakaguaré, y la microcuenca de un arroyo sin nombre que drena sus aguas al arroyo Capiíbary (Figura 1).

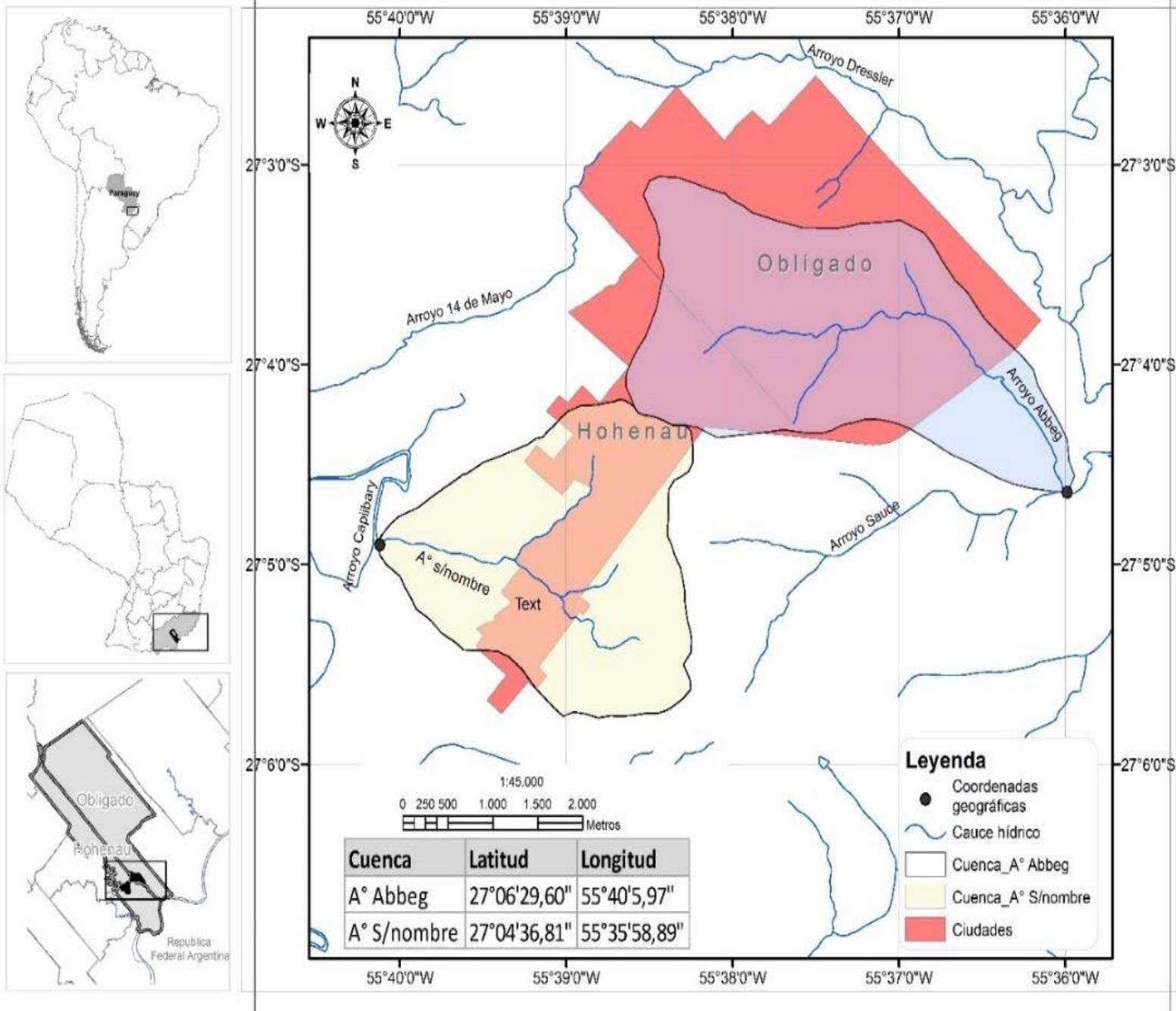


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en Paraguay en el ámbito distrital. Microcuencas ubicadas en el departamento de Itapúa (distritos de Hohenau y Obligado) y sus coordenadas geográficas.

En la microcuenca del arroyo Abbeg se localiza gran parte del centro urbano de Obligado (Figura 2), por lo tanto, en adelante se denominará microcuenca O, la cual tiene una superficie de 741 ha y su cauce principal tiene una longitud de 4 850 m. La microcuenca del arroyo sin nombre se ubica el centro urbano de Hohenau (Figura 3) y por lo tanto se denominará microcuenca H, la cual cuenta con una superficie de 598 ha y la longitud de su cauce es de 3 217 m.

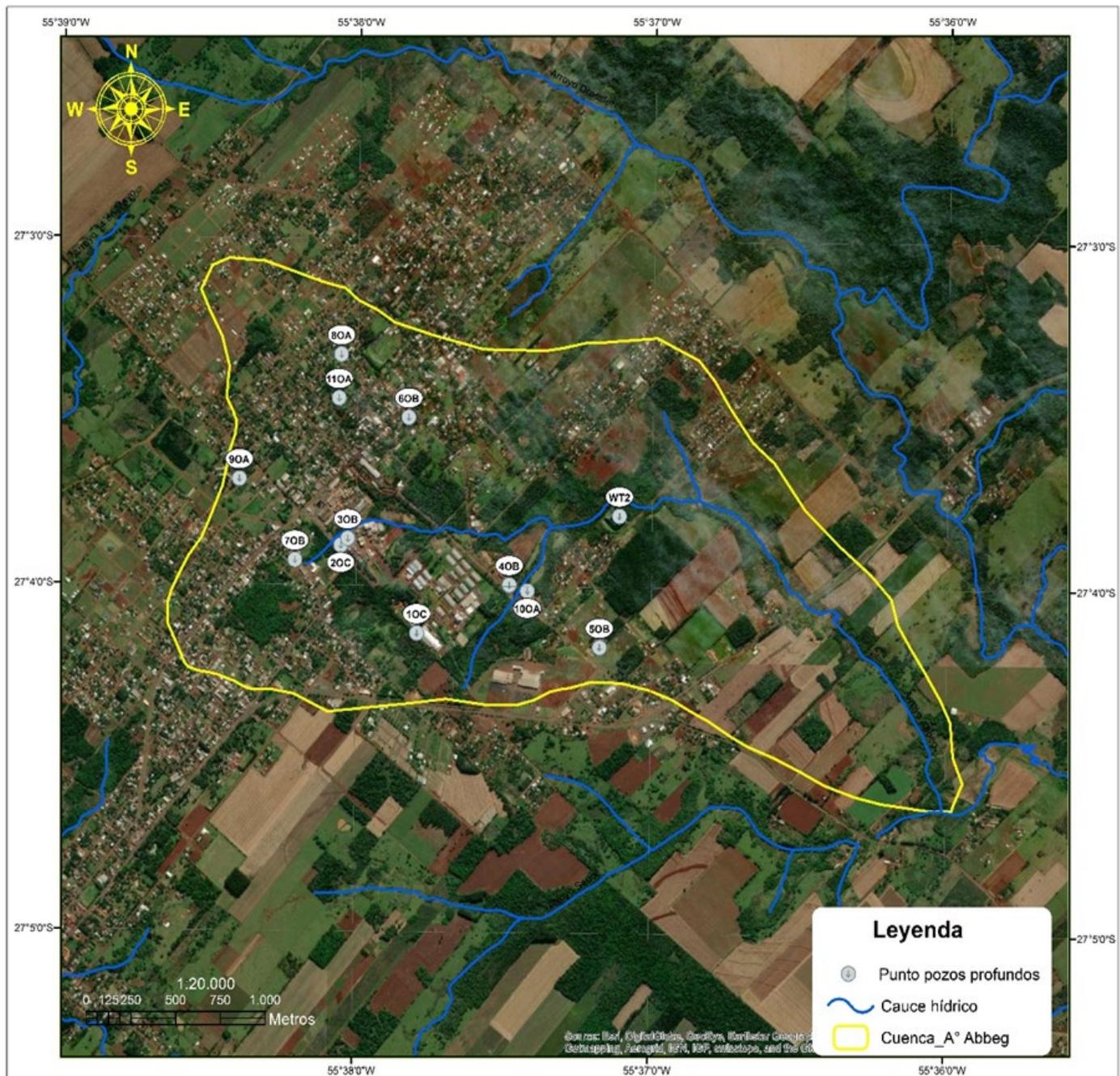


Figura 2. Ubicación de los 11 pozos profundos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Obligado (WT2) ubicados en la microcuenca O.

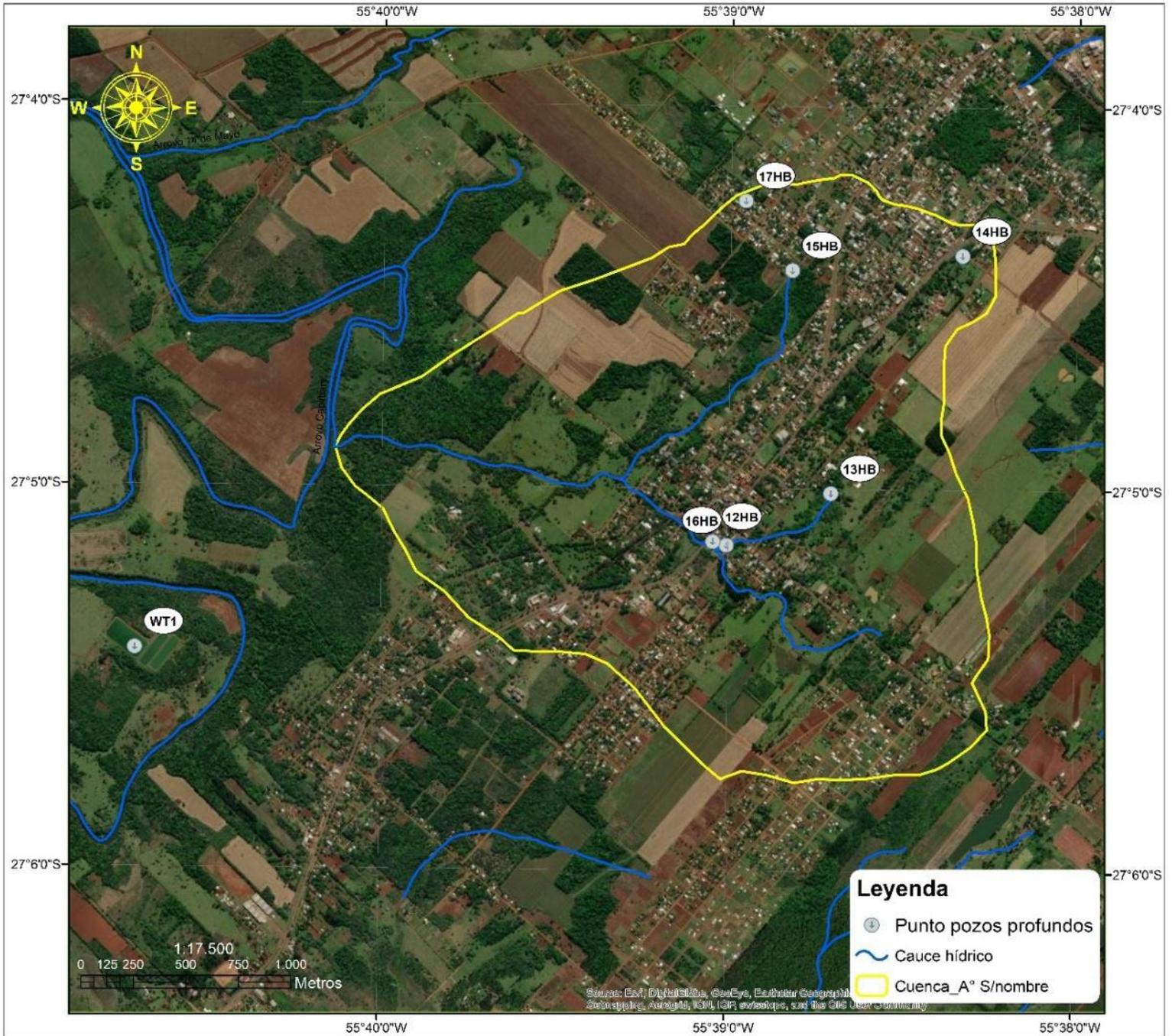


Figura 3. Ubicación de los seis pozos profundos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Hohenau (WT1) ubicados en la microcuenca H.

La zona de estudio se caracteriza por su elevada riqueza hídrica, asentada sobre el acuífero Guaraní. Está conformada por rocas sedimentarias de areniscas que almacenan grandes volúmenes de agua en los espacios porosos que presentan (Houben *et al.*, 2012). En el área de estudio hay de manera predominante dos tipos de suelos: ultisol 10 en las partes altas y medias de las cuencas, y en menor proporción ultisol 2 en las partes bajas de ambas cuencas. El ultisol 10 se da sobre roca basáltica (formación B) y en menor extensión sobre areniscas (formación A), pero siempre en lomadas con buen drenaje superficial. Las clases de suelo se clasifican como II, III y V, con predominio de clase III: pendientes del 8 al 15 %, profundidad efectiva del suelo de 75 a 100 cm, drenaje y permeabilidad rápida (Gorostiaga *et al.*, 1995).

Materiales y métodos

Calidad del agua subterránea

Para evaluar la calidad del agua se emplearon los resultados de los análisis de laboratorio de 11 pozos profundos. Estos datos fueron suministrados por propietarios privados (PP) y por las Juntas de Saneamiento (JS), que son las entidades encargadas de proveer agua a las comunidades. Los parámetros analizados fueron los siguientes: a) microbiológico: coliformes totales; b) físico: pH; c) químicos: alcalinidad, aluminio, amonio, calcio, cloruros, cobre, dureza total, fosforo, hierro, magnesio, nitrato, potasio, sodio y sulfatos. Los resultados se compararon con los umbrales establecidos en las normativas ambientales relacionadas con la

calidad del agua para el consumo humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) y las Normas Oficiales Paraguayas Erssan (Erssan, 2000) para determinar si se presenta o no deterioro en la calidad del agua. Una vez que se identificaron los parámetros de calidad de agua afectados (contaminación), se relacionaron estos datos con las precipitaciones y con la formación geológica para identificar las posibles causas.

Los análisis de agua se efectuaron entre 2006 y 2016, con excepción de los años 2007 y 2011, en los cuales no se encontró información disponible. Los datos de 2013 se descartaron por la baja confiabilidad que presentaron debido a que mostraron el mismo valor en todos los puntos de muestreo. En total, se analizaron 59 muestras, de las cuales seis se descartaron de los análisis microbiológicos por contar con un solo dato. Las muestras no fueron similares en cantidad de tomas por año. Las características de construcción y formación geológica de los pozos se describen en la Tabla 1. Los pozos se codificaron para un mejor manejo de los datos y el cálculo estadístico de los mismos. De los 17 pozos ubicados en la zona de estudio, 11 corresponden a la microcuenca O y 6 a la microcuenca H (Tabla 1, Figura 2 y Figura 3).

Tabla 1. Información de los pozos profundos del área de estudio, año de construcción, fuente de la información, profundidad, cota, formación geológica, y cantidad de muestras de agua y año de toma de la muestra.

Código	Año de construcción	Fuente de la información	Profundidad (m)	Cota msnm	Formación geológica	Cantidad de muestras (año)
10C	2002	PP	140	174	Basalto/arenisca	1 (2010)
20C	1994	PP	235	163	Basalto/arenisca	1 (2010)
30B	2002	PP	171	165	Basalto	1 (2010)
40B	2007	PP	102	149	Basalto	1 (2010)
50B	2004	PP	105	163	Basalto	1 (2010)
60B	1995	PP	105	190	Basalto	1 (2010)
70B	1979	JS	60	165	Basalto	4 (2006-2008-2009-2014)
80A	1990	JS	203	203	Arenisca	6 (2008-2010-2012-2013)
90A	1996	JS	141	197	Arenisca	2 (2008-2009)
100A	1999	JS	150	148	Arenisca	7 (2006-2008-2009-2012-2013-2014-2016)
110A	2002	JS	160	186	Arenisca	3 (2006-2008-2009)
12HB	1984	JS	71	164	Basalto	5 (2006-2013-2015-2016)

Código	Año de construcción	Fuente de la información	Profundidad (m)	Cota msnm	Formación geológica	Cantidad de muestras (año)
13HB	1991	JS	167	186	Basalto	6 (2006-2013-2015)
14HB	2000	JS	146	194	Basalto	6 (2006-2013-2014-2015)
15HB	2001	JS	205	173	Basalto	3 (2014-2015-2016)
16HB	2004	JS	75	160	Basalto	6 (2006-2014-2015-2016)
17HB	2013	JS	180	184	Basalto	5 (2014)

O = microcuenca O (distrito de Obligado)

H = microcuenca H (distrito de Hohenau)

A = areniscas

B = basalto

C = combinado (basalto sobre areniscas)

JS = Junta de Saneamiento

PP = pozos privados

La nomenclatura para la identificación de cada pozo incluye un número, seguido de la letra correspondiente a la microcuenca; las letras A-B-C representan el material de origen (arenisca, basalto y combinado, respectivamente).

En la Figura 2 se puede apreciar la ubicación de los 11 pozos junto con la planta de tratamiento de aguas residuales de Obligado, la cual está designada con la etiqueta WT2.

En la Figura 3 se observa la ubicación de los seis pozos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Hohenau, que se identifica con la nomenclatura WT1.

Análisis estadístico

Se utilizó el análisis de varianza y contraste de medias para la identificación de diferencias significativas entre las variables; se aplicó la prueba de Duncan al 5 % de significancia. Para los análisis se usó el programa estadístico Infostat versión 2017 (Di Rienzo *et al.*, 2017). Para el análisis de parámetros se han descartado pozos con un solo dato debido a que genera una dispersión estadística muy marcada.

Eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias (PTAR)

A continuación, se describen las características de las PTAR ubicadas en el área de estudio:

1. PTAR Hohenau consta de tres piletas aerobias y un espejo de agua de 3.2 ha. Abarca 2 063 usuarios y está proyectada para 10 829. Funciona desde el año 2006. Para una mejor presentación de resultados se codificaron los puntos muestreo: el primer punto (P1) es la entrada; se pasa por los tres puntos (piletas) intermedios (P2, P3 y P4); el último punto (P5) es la salida del agua.
2. PTAR Obligado consta de desarenador, sistema RAFA combinado con dos piletas facultativas y un espejo de agua de 0.61 ha. Abarca 2

291 usuarios y está proyectada para 10 000. Funciona desde el año 2013. Para una mejor presentación de resultados se codificaron los puntos de muestreo: el primer punto (P1) la entrada y el último punto (P5) la salida del agua; se pasa por el sistema RAFA (P2) combinado con dos piletas facultativas (P3 y P4).

En cuanto a los datos utilizados, para la PTAR de Hohenau se utilizaron datos del año 2010, y para la de Obligado datos de los años 2014, 2015 y 2016. Para este estudio se tomaron nuevas muestras en ambas PTAR, según el Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN, 2001), en dos épocas de 2017: una en marzo (otoño) y otra en septiembre (primavera). Los resultados de los análisis se compararon con los umbrales establecidos en la Ley 1614/2000 y en la Resolución 222/2002, que establece el padrón de calidad de las aguas en Paraguay.

Metales pesados

Para cada muestra se tomó 1 kg de lodo en cada PTAR, posteriormente se remitieron a la Universidad Nacional de Misiones (UNAM), Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (FCEQYN), Programa Efluentes Industriales y Urbanos. Los metales analizados fueron Cr total, Cd, Pb y Hg. Para el análisis del Cr total, Cd y Pb se utilizó el método de espectrometría de absorción atómica con aspiración de llama según EPA600/R-94/111 Método 200.2 con espectrofotómetro de AA Analyst 700, utilizando los protocolos de la UNAM-FCEQYN. Para el caso del Hg, se usó la espectrometría de absorción atómica de marca AA Perkin Elmer, con inyección en flujo con generación de vapor frío; la muestra se preparó

según EPA600/R-94/FIAS/MHS utilizando los protocolos de la UNAM-FCEQYN. Los resultados se contrastaron con las normas de México (NOM-004; Semarnat, 2002); de EUA (USEPA 503; USEPA, 1995), y de la Comunidad Europea (CEC, 1986) debido a que Paraguay no cuenta con normativa para metales pesados en lodos.

Resultados

Calidad del agua subterránea

Parámetros microbiológicos

Las aguas subterráneas presentaron contaminación microbiológica, específicamente por presencia de coliformes totales. Sin embargo, todos los valores de los parámetros físico-químicos se encontraron dentro de los límites establecidos en la normativa nacional de la Ley N° 1614/2000 (Erssan, 2000) y en la norma de calidad de agua de la OMS (2011). Las concentraciones de coliformes totales detectadas variaron entre 10 UFC/100 ml en los pozos de Hohenau y 326 UFC/100 ml, que llegaron a alcanzar en los pozos de Obligado (Figura 4).

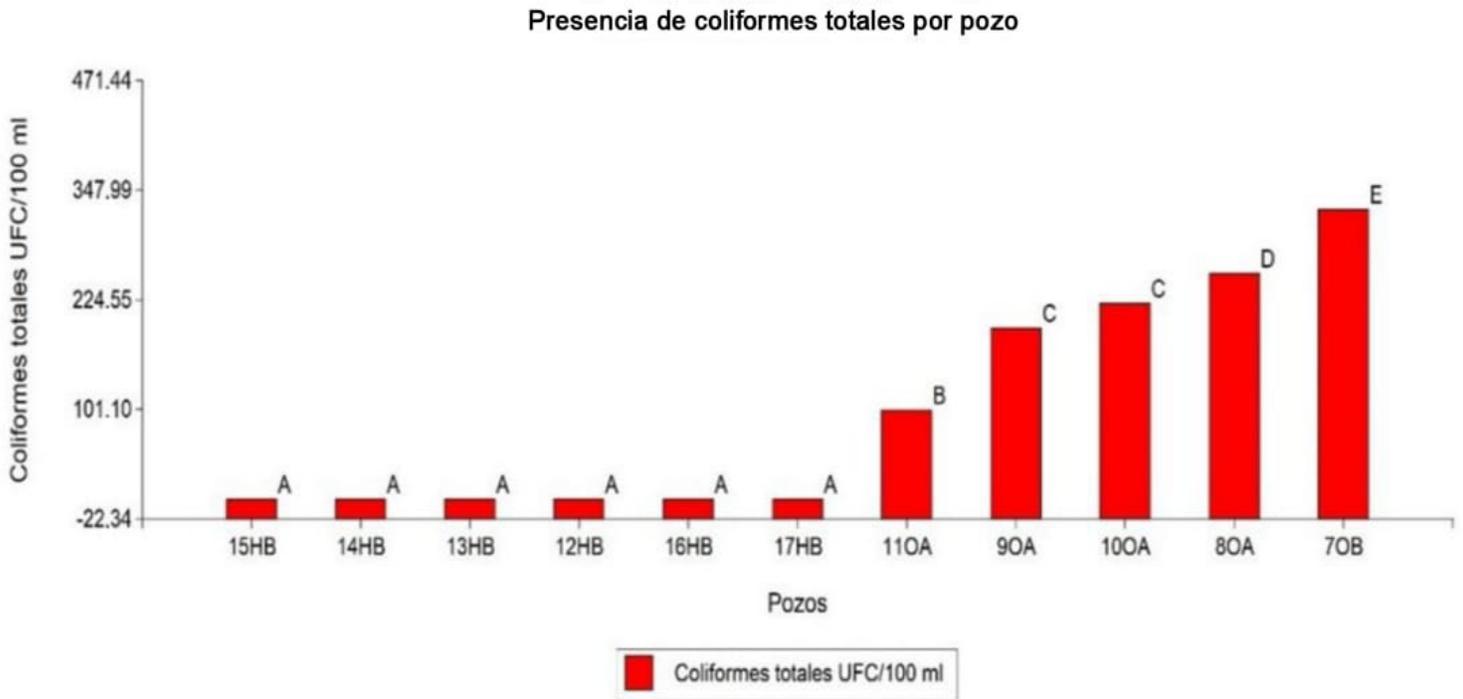


Figura 4. Presencia de coliformes totales en aguas de pozos distribuidos en el área de estudio. Medias que no comparten una letra (A, B, C, D o E) son significativamente diferentes.

Los resultados indican que los pozos ubicados sobre la formación geológica Misiones (arenisca) son más susceptibles a la contaminación por coliformes totales. La infiltración más rápida en la arenisca hace que los pozos sean más vulnerables. Los pozos ubicados sobre el basalto tienen menor presencia de coliformes totales debido a la estructura menos porosa de esta formación geológica (Figura 5).

Coliformes totales y formación geológica

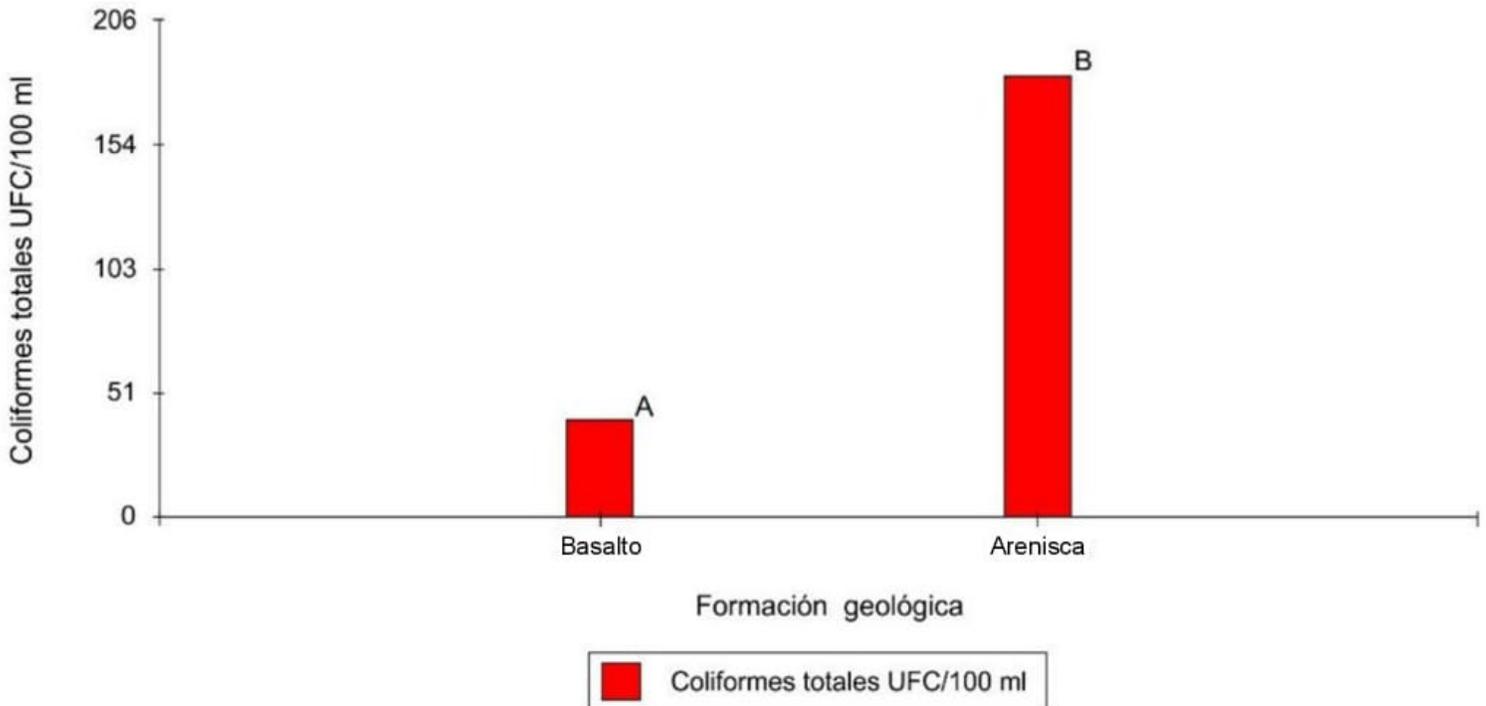


Figura 5. Presencia de coliformes totales en aguas de pozos distribuidos en el área de estudio atendiendo formación geológica. Medias que no comparten una letra (A y B) son significativamente diferentes.

La mayor presencia de coliformes totales está directamente relacionada con la formación geológica; la formación Misiones (areniscas) es la más afectada. Por otro lado, no se encontró relación de la presencia de estos coliformes con la precipitación.

Parámetros físico-químicos

Los resultados de los análisis físico-químicos indican que todos los valores se mantuvieron dentro de los límites establecidos tanto por la normativa nacional (Ley N° 1614/2000) (Erssan, 2000) como por la norma de calidad de agua de la OMS (2011). Los rangos admisibles se respetaron de acuerdo con sus límites establecidos: a) para los parámetros físicos, el pH se mantuvo en el rango de 6.5 a 8.5 mg/l; b) en cuanto a los parámetros químicos, los valores de alcalinidad, aluminio, calcio, dureza total, potasio, amonio, cloruro, cobre, hierro, nitrato, sodio y sulfato, se encontraron dentro de los límites establecidos, que son 250, 0.2, 100, 400, 12, 0.50, 250, 2, 0.3, 5, 200 y 250 mg/l, respectivamente.

Eficacia de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias

Parámetro microbiológico

En la planta de tratamiento de Hohenau, los análisis de 2010 indican una disminución de los coliformes totales luego del proceso de depuración; se mantuvo dentro de los rangos establecidos por la norma paraguaya (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de coliformes totales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau, años 2010 y 2017.

Año	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
2010	-----	> 2 419.6	> 2 419.6	1 203.3		SR
2017 (marzo)	2.4×10^5	930	4 300	93	2 100	SR
2017 (septiembre)	200	20	17	17	200	SR

SR: sin rango; P1: entrada; P2 pileta 1; P3: pileta 2; P4: pileta 3; P5: salida.

Tabla 3. Valores de coliformes fecales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau, año 2017.

Año	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
2017 (marzo)	2.4×10^5	930	4 300	93	2 100	<4 000
2017 (septiembre)	200	17	17	170	170	<4 000

SR: sin rango; P1: entrada; P2 pileta 1; P3: pileta 2; P4: pileta 3; P5: salida.

Así, los análisis más recientes de 2017 también demuestran una disminución de coliformes (totales y fecales) luego del tratamiento, a excepción de los coliformes totales que en el final del proceso (P5) volvieron a alcanzar los mismos niveles de entrada (P1), como se observa en la Tabla 2 y Tabla 3. Tanto en marzo como en septiembre de 2017 se

resalta que los valores de coliformes (totales y fecales) disminuyen durante el proceso de depuración y vuelven a aumentar a la salida del sistema al final del tratamiento. Por lo tanto, se considera que la PTAR de Hohenau no funciona correctamente. A pesar de este aumento de coliformes, los valores detectados están por debajo del máximo permisible según la Ley N° 1614/2000 (Erssan, 2000).

También en la Tabla 2 y Tabla 3 se observa que la presencia de coliformes (totales y fecales) es considerablemente menor en el muestreo 2 realizado en el mes de septiembre (primavera) comparando con el muestreo 1 realizado en otoño (marzo), correspondiente al año 2017.

En cuanto a la planta de tratamiento de agua de Obligado, se observa que presenta una buena eficacia en su funcionamiento, los parámetros microbiológicos disminuyen en la última pileta (final de proceso) y se encuentran por debajo del límite máximo permisible según la Ley 1614/2000 (Erssan, 2000) (Tabla 3).

Al igual que en la PTAR de Hohenau, en la Tabla 4 también se observa que la presencia de coliformes (totales y fecales) en la PTAR de Obligado es considerablemente menor en septiembre (primavera) comparando con marzo (otoño).

Tabla 4. Valores de coliformes fecales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado.

Año	P1	P5	Límites máximos
2014 (toma 1)	66 000	0	< 4 000
2014 (toma 2)	6 600 000	100	< 4 000
2015	2 640 000	0	< 4 000
2016	440 000	0	< 4 000
2017 (marzo)	1.1×10^6	< 3	< 4 000
2017 (septiembre)	24	14	< 4 000

P1: entrada; P5: salida.

Tabla 5. Valores de coliformes totales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado.

Año	P1	P5	Límites máximos
2017 (marzo)	1.1×10^6	< 3	SR
2017 (septiembre)	170	14	SR

P1: entrada; P5: salida.

Parámetros físico-químicos

En la planta de tratamiento Hohenau, los sólidos en suspensión y sólidos sedimentables se encontraron dentro de los rangos establecidos (entre 0 y 2 ml/g) a la salida de la PTAR. Sin embargo, los valores de DQO y DBO₅ superaron el límite máximo permisible según la Ley 1614/2000 (Tabla 6).

El pH siempre se mantuvo dentro de los rangos establecidos por la norma paraguaya (entre 5 y 9).

Tabla 6. Valores de datos físico-químicos detectados en el proceso de depuración de aguas residuales domiciliarias de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau.

	Parámetros	Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
Muestreo 1 (marzo, año 2017)	Sólido en suspensión	mg/l	91	70	47	73	73	80
	Sólidos sedimentables	ml/l	1	0.1	0.1	0.4	0.4	1
	DQO	mg/l O ₂	239	168	146	172	172	< 150
	DBO ₅	mg/l O ₂	148	108	91	103	103	< 50
	pH	pH	8.4	7	8.6	8.5	9	5-9
Muestreo 2 (septiembre, año 2017)	Sólido en suspensión	mg/l	75	55.4	47	47	44	80
	Sólidos sedimentables	ml/l	2	0.5	0	0	0	1
	DQO	mg/l O ₂	405.6	291.7	220.6	220.6	217.04	< 150
	DBO ₅	mg/l O ₂	240	190	76	76	62	< 50
	pH	pH	7.78	6.99	7.82	7.24	7.8	5-9

P1: entrada; P2: pileta 1; P3: pileta 2; P4: pileta 3; P5: salida.

Con respecto a los parámetros físicos, el proceso de depuración de la PTAR de Obligado no responde correctamente al tratamiento. Los valores del pH en dos ocasiones se encontraron en el rango superior del

límite máximo permisible (valor 9), remarcado en la tabla, entre los años 2014 y 2016 (Tabla 7), y superando en una ocasión el máximo permisible en las normas en el muestreo realizado en 2017 (Tabla 7). Sobre los parámetros químicos, solo los sólidos en suspensión se encontraron por debajo del límite máximo permisible según la Ley 1614/2000; mientras que los sólidos sedimentables, la DQO y la DBO₅ presentan valores que superan los máximos permisibles (Tabla 7). Por lo tanto, se evidencia que la PTAR no es eficiente en el proceso de depuración de estos parámetros.

Tabla 7. Valores de datos físico-químicos detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado, base de datos del proveedor del servicio de 2014 a 2016.

Muestras	Puntos/Piletas	Parámetro				
		pH	Sólido en suspensión (mg/l)	Sólidos sedimentables (mg/l)	DQO (mg/l O ₂)	DBO ₅ (mg/l O ₂)
Muestreo (2010)	P1	7.8	-----	-----	-----	-----
	P2	7.8	-----	-----	-----	-----
	P3	7.7	-----	-----	-----	-----
	Máximo permisible	5-9	-----	-----	-----	-----
Muestreo (2014-2016)	P1 (2014)	6	39.6	-----	114	265
	P5 (2014)	5	24.6	-----	74	34.5
	P1 (2014)	6	184.8	5	371.2	175.5
	P5 (2014)	9	46.2	0.2	128	39.5
	P1 (2015)	7	70.4	3	210.5	159
	P5 (2015)	8	34.8	0.8	105	63
	P5 (2015)	6	42.4	0.1	100.8	49.2
	P1 (2016)	6	15.5	1	95.9	46.8
	P5 (2016)	9	28.4	0.1	133.9	60
	P5 (2016)	6	8.4	0.1	39.9	6.6
Máximo permisible	5-9	80	1	< 150	50	

Muestras	Puntos/Piletas	Parámetro				
		pH	Sólido en suspensión (mg/l)	Sólidos sedimentables (mg/l)	DQO (mg/l O ₂)	DBO ₅ (mg/l O ₂)
Muestreo 1 (marzo, 2017)	P1	6.9	57	2	224	190
	P3	10	63	0.4	112	66
	P3	10.6	61	0.1	36	22
	P4	9.4	35	0.1	29	20.3
	Máximo permisible	5-9	80	1	< 150	50
Muestreo 2 (septiembre, 2017)	P1	6.9	57	2	224	190
	P2	7.73	39	0,2	259.7	24
	P3	7.78	23	0,1	195.69	20
	P4	7.6	19	0	174.3	8
	Máximo permisible	5-9	80	1	< 150	50

P1: entrada; P5: salida.

Metales pesados en lodos

Los valores de los metales pesados detectados no sobrepasaron los límites establecidos en las tres normas internacionales consideradas en este estudio (Tabla 8).

Tabla 8. Concentración de metales pesados detectados en lodos de las plantas de tratamiento de efluentes domiciliarios de Hohenau y Obligado, y límites permisibles según las normas mexicana, estadounidense y de la Comunidad Europea.

Metales mg/kg	M1 mg/kg	M2 mg/kg	NOM-004- Semarnat-2002		USEPA 503		Comunidad Europea	
			Excelente mg/kg	Bueno mg/kg	LG mg/kg	CE mg/kg	pH<7	pH>7
Cr total	79	38.5	1 200	3 000	3 000	1 200	1 000	1 500
Cd	< 2	< 2	39	85	85	39	20	40
Pb	70.7	28.2	300	840	840	300	750	1 200
Hg	0.08	0.05	17	57	57	17	16	25

M1 = muestra planta de tratamiento de efluentes domiciliarios de Hohenau

M2 = muestra planta de tratamiento de efluentes domiciliarios de Obligado

Cr total = cromo total

Cd = cadmio

Pb = plomo

Hg = mercurio

LG = límite general

CE = calidad excelente

Se detectó la presencia de trazas de Cr total, Pb y Hg. Si bien las concentraciones encontradas no sobrepasan los límites de rangos permisibles en las normas internacionales NOM-004-SEMARNAT-2002 (Mexicana), USEPA 503 (Estados Unidos) y CEC (norma de la Comunidad

Europea), se desconoce el origen de la detección de estas trazas. No se detectó presencia de Cd según los métodos aplicados, siendo su límite de cuantificación 2.0 mg/kg y límite de detección 1.0 mg/kg.

Discusión

En este estudio se evidencia la contaminación del agua subterránea por coliformes totales en áreas de recarga del acuífero Guaraní, al igual que en otros estudios realizados en Itapúa (Houben *et al.*, 2012). y Cordillera (Sotomayor, Villagra, Cristaldo, Silva, & Ibáñez, 2013). Entre las causas más comunes de la contaminación bacteriana del agua subterránea se pueden citar la construcción inadecuada de los pozos; el mantenimiento deficiente de los mismos; y la vulnerabilidad a la contaminación intrínseca de un acuífero, como la profundidad del nivel freático, la geología, etcétera (Rodríguez, Gauna, Martínez, Acevedo, & Romero, 2012). De acuerdo con Larroza, Fariña, Baez y Cabral (2005), la construcción inadecuada de los pozos también se debe al sello sanitario deficiente o a la falta de tapa en los pozos cavados.

La mayor presencia de coliformes en las aguas subterráneas contenidas en la formación Misiones en comparación con la formación Alto Paraná podría explicarse por la porosidad y textura del material geológico. Los acuíferos de la formación Misiones están constituidos por materiales no consolidados o aluviales, por lo tanto existe una mayor dispersión de la corriente subterránea en el material poroso y mayor susceptibilidad a la contaminación. Otros estudios también indicaron que el área donde subflora la arenisca Misiones es altamente susceptible a la contaminación de las aguas subterráneas en comparación con los

afloramientos de basalto de la formación Alto Paraná (Veroslavsky & Manganelli, 2018; Musálem, McDonald, Jiménez, & Laino, 2015; Eisenkölbl, 2013; SAG-PY, 2009; PSAG, 2009). Sin embargo, Fariña, Vassolo, Cabral, Vera y Jara (2004) advierten que la formación Alto Paraná igualmente tiene una alta vulnerabilidad puntual a la contaminación en las fracturas de la matriz rocosa (Arizabalo & Godínez, 1991). Por otra parte, en PAS-PY (2012) se indica que una forma directa de contaminación de las aguas subterráneas se da a través de los pozos sépticos (pozos ciegos) en zonas urbanas o letrinas en zonas rurales, así el agua residual es vertida directamente al agua subterránea, omitiendo la capacidad de purificación del suelo. Cabe mencionar que las bacterias fecales tienen un tiempo de supervivencia máximo de aproximadamente 50 días fuera del cuerpo humano, por lo que las fuentes de contaminación tienen que estar en las cercanías de los pozos.

En cuanto a los parámetros físicos-químicos, los resultados indican que los mismos se encuentran por debajo de los rangos permisibles según la OMS (2011) a nivel internacional y a nivel nacional según la Ley núm. 1614/2000 (Erssan, 2000). Estos resultados también coinciden con otros estudios nacionales (Houben *et al.*, 2012). e internacionales (Papa, Castellarin, & Sánchez, 2017; Rodríguez *et al.*, 2012; Pacheco-Ávila, Cabrera-Sansores, & Pérez-Ceballos, 2004).

En ambas (PTAR) se constató un proceso inadecuado de depuración según los análisis de laboratorio. También a la salida de estos sistemas se pudo percibir una disminución en el olor y color de las aguas tratadas, lo que confirma estos resultados a nivel cualitativo según Arroba y Ávila (2015), y Morillo Y Fajardo (2005). Con respecto a los parámetros químicos, a pesar de que los valores disminuyeron luego del tratamiento,

la reducción no es suficiente para verter el efluente al cauce hídrico receptor según las normas. Esta situación podría deberse a ineficiencias en la operación de las PTAR, al mal diseño de las mismas y/o a la falta de monitoreos permanentes (Mercado-Guzmán, Cossío-Grágeda & Copa-Mitma, 2020; Mahlkecht, 2013). En el ámbito internacional, en otros países reportan que la principal causa de contaminación en ríos se debe al vertido de afluentes cloacales sin tratar, a la falta de redes recolectoras y/o fugas en las redes ya existentes (Hirata *et al.*, 2019; Zimmermann, 2013).

A pesar de que los resultados de este estudio no son alarmantes en relación con las trazas de metales pesados detectadas en los lodos de ambas PTAR porque no sobrepasan los límites permisibles (OMS, 2011), la presencia de algunos metales llama la atención debido a que se desconoce su origen y pueden ser vertidos a los recursos hídricos receptores durante el proceso.

Conclusiones

El agua subterránea de los pozos que abastecen a la población de los centros urbanos de Obligado y Hohenau está contaminada por coliformes totales. Dicha contaminación afecta la calidad del agua del acuífero Guaraní y se relaciona directamente con la formación geológica, por lo que es más susceptible a contaminarse la formación Misiones (areniscas).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales instaladas en ambas ciudades tienen un sistema deficiente de depuración de parámetros microbiológicos y físico-químicos. Se detectó presencia de Pb, Cr total y Hg en los lodos de ambas plantas de tratamiento, sin embargo las

concentraciones no sobrepasaron los rangos permisibles en el nivel internacional. A pesar de ello, los resultados resaltan la necesidad de identificar el origen de estos metales, pues al estar presentes en los lodos pueden ser transportados hasta los cauces hídricos y concentrarse en los lechos de los ríos. No se detectó presencia de Cd en los lodos de las plantas de tratamiento.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). A la Universidad Nacional de Itapúa-Escuela de Postgrado. A la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Campus de Itapúa, Facultad de Ciencias Agropecuarias. A los directivos y funcionarios de la Junta de Saneamiento Ambiental de Obligado y a la Junta de Saneamiento de Hohenau.

Referencias

Arizabalo, R., & Godínez, G. (1991). La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos. *Cuadernos del Instituto de Geofísica núm. 6*. México, DF, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/316004500_La_contaminacion_del_agua_subterranea_y_su_transporte_en_medios_porosos

Arroba, C., & Ávila, D. (2015). *Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales de un campus universitario* (proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9408/%C3%81vilaDavid2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CEC, Council of the European Communities. (1986). Directive concerning sludge amendments. *Official Journal*, June 12, L181/6.

CIC, Council of the European Communities. (2004). Visión de los recursos hídricos en Paraguay. Informe final. Recuperado de <https://www.geologiadelparaguay.com.py/Vision-de-los-Recursos-Hidricos-en-Paraguay.pdf>

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2017). *InfoStat versión 2017*. Recuperado de <http://www.inf.com.ar>

Eisenkölbl, A. (2013). *Delimitación de perímetros de protección para pozos artesianos en suelos de formación Misiones. Trinidad. Itapúa*. (tesis de maestría), Universidad Nacional de Itapúa, Postgrado, Encarnación. Recuperado de https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/Beca15-25_Alicia_Einsenkolbl.pdf

- Erssan, Ente Regulador de Servicios Sanitarios. (2000). *Tarifario del servicio de agua potable y alcantarillado sanitario Ley N ° 1 .614 / 2000 Reglamento de Calidad en la Prestación del Servicio Permisarios*. Recuperado de <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/1694/ley-n-1614-general-del-marco-regulatorio-y-tarifario-del-servicio-publico-de-provision-de-agua-potable-y-alcantarillado-sanitario-para-la-republica-del-paraguay>
- Fariña, S., Vassolo, S., Cabral, N., Vera, S., & Jara, S. (2004). *Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica del sistema acuífero guaraní (sag) en la Región Oriental del Paraguay al sur de la latitud 25° 30'*. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recuperado de https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=pLyzqZoAAAAJ&citation_for_view=pLyzqZoAAAAJ:2osOgNQ5qMEC
- García, B., & Faggioli, A. (2018). Problemática acuífera en el contexto sudamericano del siglo XXI. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 1(3), 103-110. Recuperado de <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/60>
- Gorostiaga, O., González E., De Llamas, P., Molinas, A., Franco, E., García, S., & Ríos, E. (1995). *Geología del Paraguay. Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de la Región Oriental del Paraguay (PRUT). Proyecto de racionalización del uso de la tierra (Préstamo nro. 3445-pa)*. Recuperado de <http://www.geologiadelparaguay.com/Estudio-de-Reconocimiento-de-Suelos-Regi%C3%B3n-Oriental-Paraguay.pdf>

- Hirata, R., Vieira, A., Susko, S., Villar, P., & Marcellini, L. (2019). *Trata Brasil*. Recuperado de http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/aguas-subterraneas-e-saneamento-basico/Estudo_aguas_subterraneas_FINAL.pdf
- Houben, G., Eisenkölbl, A., Vera, S., Olavarrieta, A., Dose, E., Rojas, C., Martínez, R., Medina Netto, A., Larroza, F., & Silvero, J. (2012). *Investigación de la calidad del agua: Cuenca Hídrica del Arroyo Capiibary, Departamento de Itapúa*. Recuperado de <https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2018/06/Informe-Final-Capiibary.pdf>
- INTN, Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología. (2001). Norma Paraguaya NP 24 001 80 agua potable especificaciones (5ª ed.). Asunción, Paraguay: Organismo Nacional de Certificación y Normalización del Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología.
- Larroza, F., Fariña, S., Baez, J., & Cabral, N. (2005). *Evaluación hidrogeológica y protección a la contaminación del agua subterránea en la Reserva de la Biosfera del Bosque Mbaracayu (RBBMb)*. Recuperado de <http://www.geologiadelparaguay.com.py/Evaluaci%C3%B3n-Hidrogeol%C3%B3gica-Reserva-Mbaracay%C3%BA.pdf>
- Mahlknecht, J. (marzo, 2013). *Centro del Agua para América Latina y el Caribe*. Recuperado de <https://www.academia.edu/RegisterToDownload/UserTaggingSurvey>

Mercado-Guzmán, Á., Cossío-Grágeda, C., & Copa-Mitma, M. (marzo, 2020). Eficiencia vinculada a la operación y mantenimiento de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*, 9(4), 524-542. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/352731694_Eficiencia_vinculada_a_la_operacion_y_mantenimiento_de_pequenas_plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales_domesticas_en_Cochabamba_Bolivia

MOPC, Ministerio de Obras Públicas y Comunicación. (2018). *Plan nacional de agua potable y saneamiento*. Recuperado de <https://siaparaguay.ine.gov.py/data/archivos/3.%20Plan%20Nacional%20de%20Agua%20Potable%20y%20Saneamiento.pdf>

Morillo, F., & Fajardo, E. (2005). *Universidad Nacional de Colombia. Estudio de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda*. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3471/fernandacristinamorilloleon.2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Musálem, K., McDonald, M., Jiménez, F., & Laino, R. (2015). Groundwater vulnerability mapping in two watersheds affected by Yacyreta Dam in Paraguay. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 49-61. Recuperado de <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1160>

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. Recuperado de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf

- Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A., & Pérez-Ceballos, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el estado de Yucatán, México. *Ingeniería Revista Académica*, 8(2), 165-179. Recuperado de <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/diagnostico.pdf>
- Papa, J., Castellarin, J., & Sánchez, J. (2017). *La calidad del agua subterránea en el distrito Monje (departamento San Jerónimo) Santa Fe*. Recuperado de https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/1925/INTA_CRSantaFe_EEAOliveros_Papa_JC_La_calidad_del_agua_subterr%c3%a1nea_en_el_distrito_Monje.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- PSAG. (2009). *Avances en el conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní: Tomo 1 - Geología y Geofísica, P&T Consultora SRL, Volumen 1*. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.
- Rodríguez, S., Gauna, L., Martínez, G., Acevedo, H., & Romero, C. (2012). Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua. *Terra Latinoamericana*, 30, 111-119. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000200111

SAG-PY. (2009). *Proyecto para la protección ambiental y desarrollo sostenible del sistema acuífero Guaraní. Informe Técnico*. Recuperado de https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Guarani/sag-py_vol1_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Semarnat, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana (NOM004-SEMARNAT-2002). Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=736434&fecha=18/02/2002

Sotomayor, F., Villagra, V., Cristaldo, G., Silva, L., & Ibáñez, L. (2013). Determinación de la calidad microbiológica de las aguas de pozo artesiano de distritos de los departamentos Central, Cordillera y municipio Capital. *Memorias del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud*, 11(1), 5-14. Recuperado de <http://archivo.bc.una.py/index.php/RIIC/article/view/111>

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (1995). *Standard for the use and disposal of sewage sludge; 40 CFR Parts 403 and 503*. Recuperado de https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a_plain_english_guide_to_the_epa_part_503_biosolids_rule.pdf

- Veroslavsky, G., & Manganelli, A. (2018). Zonificación del sistema acuífero Guaraní en Uruguay: una guía orientativa para su gestión y protección ambiental. *Aqua-LAC*, 10(2), 61-80. DOI: 10.29104/phi-2018-aqualac-v10-n2/06
- Zarrilli, Á. (2018). Cuenca del Plata: ríos, planicies y sociedades en el Cono Sur. *Revista de Historia Regional*, 23(1), 7-36. DOI: 10.5212/Rev.Hist.Reg.v.23i1.0001
- Zimmermann, S. (2013). *Situación del agua en América Latina*. Conferencia sobre agua en Ottawa, capítulo Argentino, Club de Roma, Canadá.

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-09

Articles

Physicochemical water variations in a big Mexican hydroelectric dam, central semi-arid region

Variaciones fisicoquímicas del agua de una gran presa hidroeléctrica mexicana, región centro semiárida

Omar Rivera-Cervantes¹

Fernando González-Farías², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1238-6265>

María Guadalupe Ramos-Espinosa³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3149-064X>

Martín López-Hernández⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2207-7071>

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Ciudad de México, México, rico791119@gmail.com

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Laboratorio de Química Ambiental, Ciudad de México, México, gfarias@unam.mx

³Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Departamento de Producción Agrícola y Animal, Ciudad de México, México, mgramos@correo.xoc.uam.mx



⁴Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Laboratorio de Química Ambiental, Ciudad de México, México, martinl@cmarl.unam.mx

Corresponding author: Martín López-Hernández,
martinl@cmarl.unam.mx

Abstract

The Zimapan hydropower plant built in 1995 was the first project to take advantage of Mexico's City wastewater for electric power generation. This tropical reservoir receives pollutants that affect water quality from municipal, agricultural, and industrial wastewater through the Tula and San Juan rivers. The study considered the changes in the physicochemical parameters (surface to 20 m depth) for May (wet warm), November (wet cold-after rains), and February (dry cold) in seven dam sites: two lotic, two transitional, and three lentic sites. Mean values ranges were temperature 20.71-24.38 °C, 1.59-7.56 mg/l dissolved oxygen, Secchi disk transparency 2.26-3.98 m, pH 7.12-8.40, electrical conductivity 48-1334 $\mu\text{S}/\text{cm}$, total nitrogen 14.20-30.74 mg/l, total phosphorus 10.45-15.83 mg/l, and dissolved organic carbon 9.11-20.63 mg/l. In November, all the reservoir surface water was hypoxic due to increased dissolved organic carbon by river input. Even though dissolved oxygen has a seasonal variation, this reservoir has a sustainable fishery of tilapia and black bass (~400 tons/y). The dam is meromictic and hypereutrophic, with seasonal water quality variations with no significant spatial variations. Water quality variation observed in this study can be useful to

Mexican decision-makers on water and fisheries management, prevent massive fish kills, and be a support guide for commercial and sport fishers.

Keywords: Hydroelectric dam, semi-arid, meromictic, hypoxic waters, fisheries.

Resumen

La central hidroeléctrica Zimapán, construida en 1995, fue el primer proyecto en aprovechar las aguas residuales de la Ciudad de México para generar energía eléctrica. Este embalse tropical recibe contaminantes que afectan la calidad del agua, y que provienen de los escurrimientos municipales, agrícolas e industriales transportadas por los ríos Tula y San Juan. Este estudio registró cambios en los parámetros fisicoquímicos (superficie a 20 m de profundidad) para mayo (cálido húmedo), noviembre (frío húmedo, después de las lluvias) y febrero (frío seco) en siete sitios de represas: dos lóticos, dos de transición y tres sitios lénticos. Los valores medios fueron temperatura 20.71-24.38 °C, oxígeno disuelto 1.59-7.56 mg/l, transparencia del disco Secchi 2.26-3.98 m, pH 7.2-8.40, conductividad eléctrica 48-1334 $\mu\text{S}/\text{cm}$, nitrógeno total 14.20-30.74 mg/l, fósforo total 10.45-15.83 mg/l y carbono orgánico disuelto 9.11-20.63 mg/l. En noviembre, toda el agua superficial en el embalse estaba hipóxica luego de un aumento en la entrada del río de carbono orgánico disuelto. A pesar de que el oxígeno disuelto varía estacionalmente, el embalse sostiene una pesquería de tilapia y lobina negra (~400 ton/y). La presa es meromíctica e hipereutrófica, con variaciones estacionales en la calidad del agua y sin variaciones espaciales significativas. Las

variaciones en la calidad del agua registradas en este estudio pueden ser de utilidad para los tomadores de decisiones en México sobre el manejo del agua y la pesca en la prevención de muertes masivas de peces, y como guía de apoyo para los pescadores comerciales y deportivos.

Palabras clave: presa hidroeléctrica, semiárido, meromíctico, aguas hipóxicas, pesquerías.

Received: 17/11/2022

Accepted: 12/01/2024

Published online: 26/01/2024

Introduction

During the operation of hydroelectric dams, decreases in their water levels are generated; its location in semi-arid climates with long periods of drought and short periods of rain, it is expected that there will be considerable fluctuations in its water levels, both seasonal and interannual, with an effect on the processes of mixing, stratification and consequently on the limnological dynamics and aquatic biodiversity.

Primary producers' dynamics are influenced by changes in light conditions and nutrient availability (Leira & Cantonati, 2008; Costa, Attayde, & Becker, 2016). Reservoirs in semiarid regions have high turbidities, extreme hydrological variability, and relatively stable climatological factors, compared with temperate reservoirs (Thornton & Rast, 1993).

Hydropower dams cause adverse effects on aquatic ecosystems such as alterations in the natural river flow, sediment retention, high nutrient loads, and water quality changes. In tropical and subtropical countries, the construction of dams has been extensive. Excessive input of pollutants from urban, agricultural, livestock, and industrial wastewater impacts the water quantity and quality (Delazari-Barroso, Barroso, Huszar, & Oliveira, 2009; Kazi *et al.*, 2009; De Anda & González-Farías, 2013; Rubio-Franchini, López-Hernández, Ramos-Espinosa, & Rico-Martínez, 2016). That condition affects the aquatic biota and human health, particularly in reservoirs near large human settlements with deficient infrastructure for wastewater treatment (Kazi *et al.*, 2009; Cunha, Calijuri, & Lamparelli, 2013; Fontana *et al.*, 2014).

Mexico has more than 6 325 reservoirs, of which 210 are big dams (Conagua, 2020; World Commission on Dams, 2000), so limnological information on those reservoirs has become an essential aspect of public policy development (Alcocer & Bernal-Brooks, 2010).

This study focused on physicochemical parameters' spatial and temporal changes at seven sites along a tropical semi-arid hydroelectric dam, after the entrance of two rivers with different pollution sources. This study will be the base for understanding the effect of wastewater of the urban and industrial affluents from River Tula and River San Juan on the physicochemical water conditions of dam Zimapán.

Materials and methods

Study area

The Zimapan Hydropower dam is between the states of Queretaro and Hidalgo, Central Mexico (**Figure 1**), at 1 870 m.a.s.l., with a BS1kw climate (García-Amaro, 2004), dry semi-arid, warm with an annual average temperature of 16.0 °C, being May the warmest month (18.7 °C) and January the coldest (12.6 °C). The average annual rainfall is 591 mm, and the rainy season runs from May to October, with the highest rainfall in September (106 mm) and the lowest in February (8 mm) (Climate-Data, 2020).

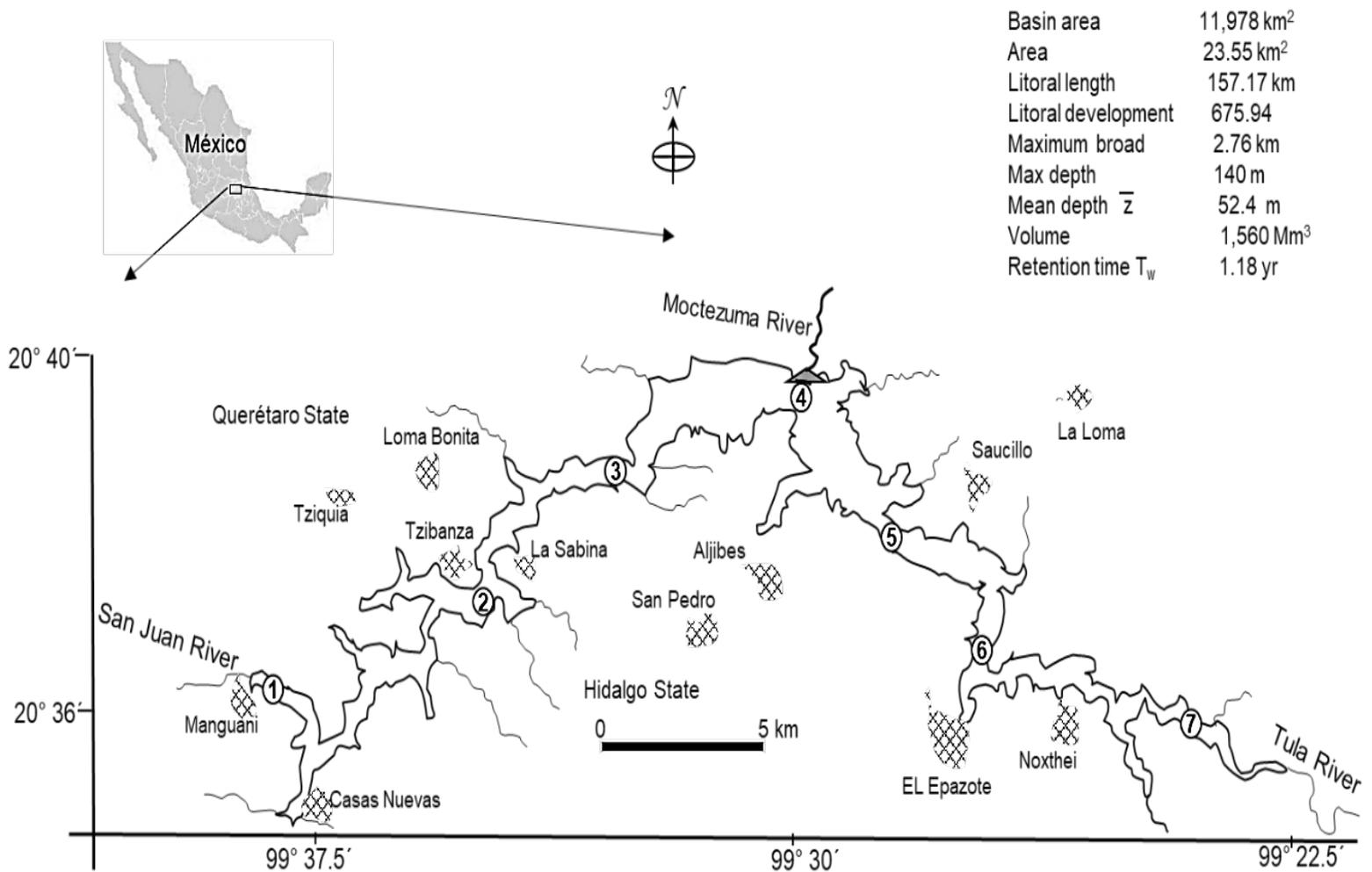


Figure 1. Location of the study area and sampling sites (1 to 7). Geological and hydrological features and main villages are presented.

The principal affluents to the reservoir are the Tula (12.3 m³/s) and San Juan (2 m³/s) rivers, which drain into the reservoir untreated urban wastewater generated in Mexico and Tequisquiapan cities, respectively.

The Tula River irrigates the Mezquital Valley whose economy is mainly agriculture based on wastewater from México City; wastewater is

regulated for irrigation by the Requena and Endho dams for irrigation of the Mezquital Valley in its northern part. The dam Endho has the extra role of primary treatment of wastewater because acts as an oxidation lagoon, and three dams below Endho, with the same role, act as a cascade reservoir system.

Also added are the drainages of the urban areas of five cities, an industrial corridor that includes an oil refinery, a thermoelectric plant, and several cement plants (Coplain Ingenieros Civiles S.A de C.V., 1985) before the entrance to the Zimapán hydroelectric dam, the river maintains lotic conditions and turbulent flow and also receives urban and agricultural runoff, as well as tributaries of springs used in spas.

The San Juan River transports water with pollutants of urban and industrial origin as it passes through the city of San Juan del Río, as well as from activities of agricultural activities such as wine, cheese, and pottery production in the tourist area of Tequisquiapan. The San Juan River also receives hot spring waters along its course, around 30 km upstream from the dam curtain.

In the reservoir, the maximum storage volume is 1 460 Mm³ on a surface of 2 300 ha, with an average depth of 50 m and a maximum of 170 m at the curtain (Randell-Badillo, 2008; Agua, 2010). Due to the high organic matter and nutrients that this dam receives from wastewaters, the nearby communities pump water for vegetable and corn crops and develop commercial aquaculture of detritivores fishes, mainly tilapia (*Oreochromis* spp.), and sport fisheries of black bass (*Micropterus salmoides*). Some towns near the dam take water by pumping for vegetable and corn crops; there is incipient tourism with boat rides, and

there is little housing development with scenic views on private properties.

Water sampling and water analysis

The seven sampling sites distributed in the reservoir considered physical and chemical water data in three different limnological zones on dams. (Thornton, 1990), *i.e.*, lotic (sites 1 and 7), transitional (sites 2 and 6), and lentic (sites 3, 4, and 5) (Figure 1). Three sampling campaigns took place considering climatic conditions: Wet-warm (May 2014), wet-cold after rains (November 2014), and dry-cold (February 2015) (Climate-Data, 2020). We consider that due to the environmental conditions of wind, temperature, and precipitation of this semi-arid area, the months selected for the study will reflect the physicochemical conditions of the reservoir.

Dissolved oxygen (DO), temperature (T), and electrical conductivity (EC) were measured in situ using a multiprobe YSI (model YSI 556) at different depths (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 and 20 m). Secchi disk transparency (SDT) with a 30 cm diameter Secchi disk; pH with multiprobe YSI, model YSI 556, measured only in surface water. Water column composite samples from surface to 3 m depth were taken using an adapted PVC tube (3' Ø x 3 m) for chemical analysis of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and dissolved organic carbon (DOC). TN and TP were analyzed with a spectrophotometer Hach DR/2010, APHA-AWWA-WPCF (1995), while DOC with a multiprobe WTW (model MIQ/C184 XT).

Fundamental statistical analysis was applied to evaluate the physical and chemical conditions of the water in the different sampling sites. A multivariate cluster analysis with Ward's Euclidean distances considered all parameters used to evaluate longitudinal patterns in the reservoir and explore the similarities among the seven sampling sites for May 2014, Nov 2014, and Feb 2015. For spatial-seasonal variations for each environmental parameter, an analysis of variance MANOVA and Wilks' lambda ($P < 0.05$) and a posteriori Tukey test were performed when ANOVA differences among the tested factors were statistically significant ($P < 0.05$). No transformations of environmental variables data before statistical analysis (Statgraphics Centurion XVI).

Results

Through time the reservoir presented depth variations due to the balance of water input by rivers, runoff, rain, and the output by evaporation and intermittent water release through the hydroelectric dam gates. Depth variation affected the hydrological parameters' behavior, mainly in the lotic and transitional sampling sites, which are shallower than the lentic sites; depth variation for lotic and transitional sites was up to 10 m and 20 m, respectively. Lentic sites always present more than 70 m in depth, so water columns tend to be more stable. The essential variations occurred from the surface to twenty meters deep; later, the values did not change significantly. We present the results of the layer (surface to 20 m depth) with the most significant variation. Descriptive statistics of measured parameters (T, DO, EC, SDT, pH, TN, TP, and DOC) are in Table 1.

Table 1. Mean, standard deviation, % coefficient variation, minimum, and maximum of the parameters were measured in surface water (0-20 m) and composite samples (0-3 m) in the Zimapan Dam.

Parameter	Month	Mean	Std Dev	% CV	Max	Min
Surface water						
Temperature (°C)	May	24.38	2.63	10.81	29.85	21.67
	November	20.71	1.33	6.45	23.65	19.78
	February	22.04	1.68	7.06	25.13	20.26
Dissolved oxygen (mg/l)	May	7.56	1.06	14.09	8.58	1.20
	November	1.59	0.23	14.97	2.34	0.74
	Feb-15	6.25	1.73	27.82	9.73	2.34
Secchi disk transparency (m)	May-14	5.60	2.63	66.26	7.00	0.52
	Nov-14	2.55	0.79	30.65	4.18	1.68
	Feb-15	2.70	0.68	26.56	3.41	1.21
pH	May-14	8.40	0.00	0.05	8.41	8.40
	Nov-14	7.90	0.08	1.03	8.00	7.80
	Feb-15	7.12	0.14	2.10	7.32	6.96
Electrical Conductivity (µS/cm)	May-14	753	99.25	13.18	847	444
	Nov-14	48	2.2	4.58	56	34
	Feb-15	1334	143	10.76	1700	820
Composite sample						
Total nitrogen (mg/l)	May-14	14.20	4.07	28.67	19.7	9.70
	Nov-14	17.69	1.61	9.10	18.80	14.40
	Feb-15	30.74	3.71	12.07	35.6	26.80
Total phosphorous (mg/l)	May-14	15.83	5.57	35.21	24.6	9.71
	Nov-14	10.45	0.94	8.99	11.9	8.90
	Feb-15	13.90	1.76	12.66	16.2	11.90
Dissolved organic carbon (mg/l)	May-14	9.11	1.44	15.84	11.1	7.52
	Nov-14	20.63	5.22	29.37	32.4	18.11
	Feb-15	17.54	3.59	20.44	24.10	12.74

Temperature (T)

Air temperature in semiarid regions and seasonal changes are important in large reservoirs for the detection of stratification and circulation processes, the solubility of OD, as well as in fish reproduction, which sustains fishing Commercial, or sporting in the reservoir. In May the average air temperature was 28 -22 °C and 14-10 °C in November. The decreasing thermal gradient along the reservoir in May sites 1-7 was 30-22 °C, and November had a lower mean temperature of 21 °C. February, temperature increased between 22 and 25 °C, except in sites 2 and 3.

Stratification conditions with the epilimnion were detected at 2 m in May and 5 m in February, considering the surface to 70 m depth, the hypolimnion occupies more than 80 % of the total water column. May present temperatures ranged 22-30 °C from surface to 5 m depth, then discontinuous decreases until 20 °C at 20 m. In the mixing process, November is practically 4-20 m depth 20 °C with no changes; February with thermocline similar to May but with a lower temperature of 20-26 °C, the surface to 5 m, in hypolimnion without changes of 20 °C to 70 m.

All year-round surface water T in the Zimapan reservoir was higher than 20 °C (Table 1), like other tropical water bodies in Mexico (Torres-Orozco & Zanatta, 1998; De Anda, Quiñones-Cisneros, French, & Guzmán, 1998; De Anda & Shear, 2013; Sigala *et al.*, 2017). At depths greater than 30 meters, the temperature remained constant at 18.5 °C (Figure 2).

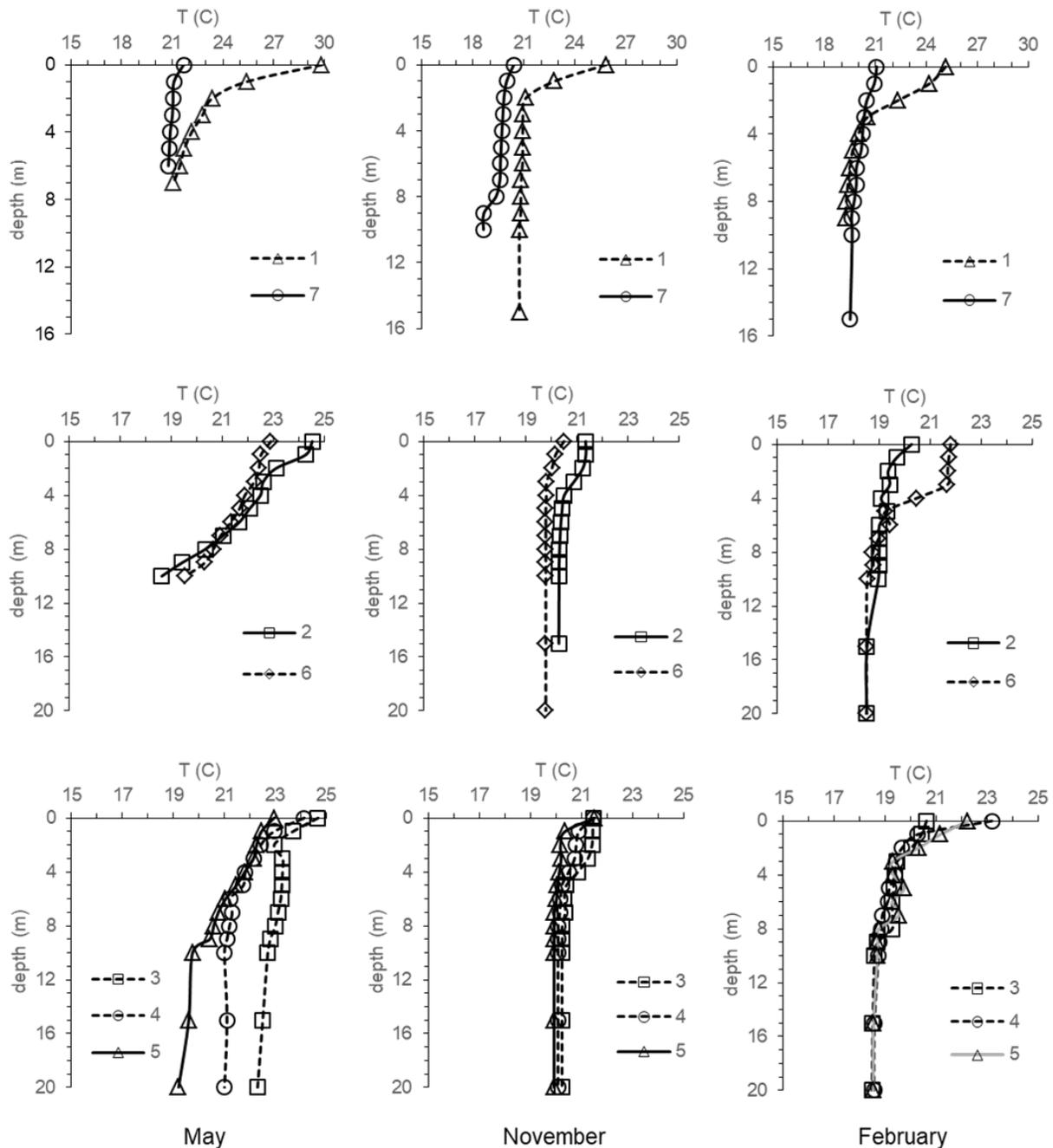


Figure 2. Temperature (°C) profiles of lotic (1 and 7), transitional (2 and 6), and lentic (3, 4, and 5) sites for May 2014, November 2014, and February 2015.

The presence of thermal waters (38 °C) close to riparian site 1 (San Juan River) influenced the highest temperatures (22-30 °C), conversely inlets in site 7 (Tula Tula) caused the lowest values (21-24 °C) (Figure 2).

Dissolved oxygen (DO)

DO profiles of lotic (1 and 7), transitional (2 and 6), and lentic (3, 4, and 5) sites are in Figure 3. DO mean values (Table 1) were high for May 2014 (7.56 mg/l) and Feb 2015 (6.25 mg/l) and very low for Nov 2014 (1.59 mg/l). In general, DO in surface water in May 2014 and Feb 2015 was around 4 mg/l, while in Nov 2014 was utterly different from the other months. The highest value was 2.34 mg/l in surface water at lotic site1, or the rest of all sites and depths, DO below 2.00 mg/l (Figure 3).

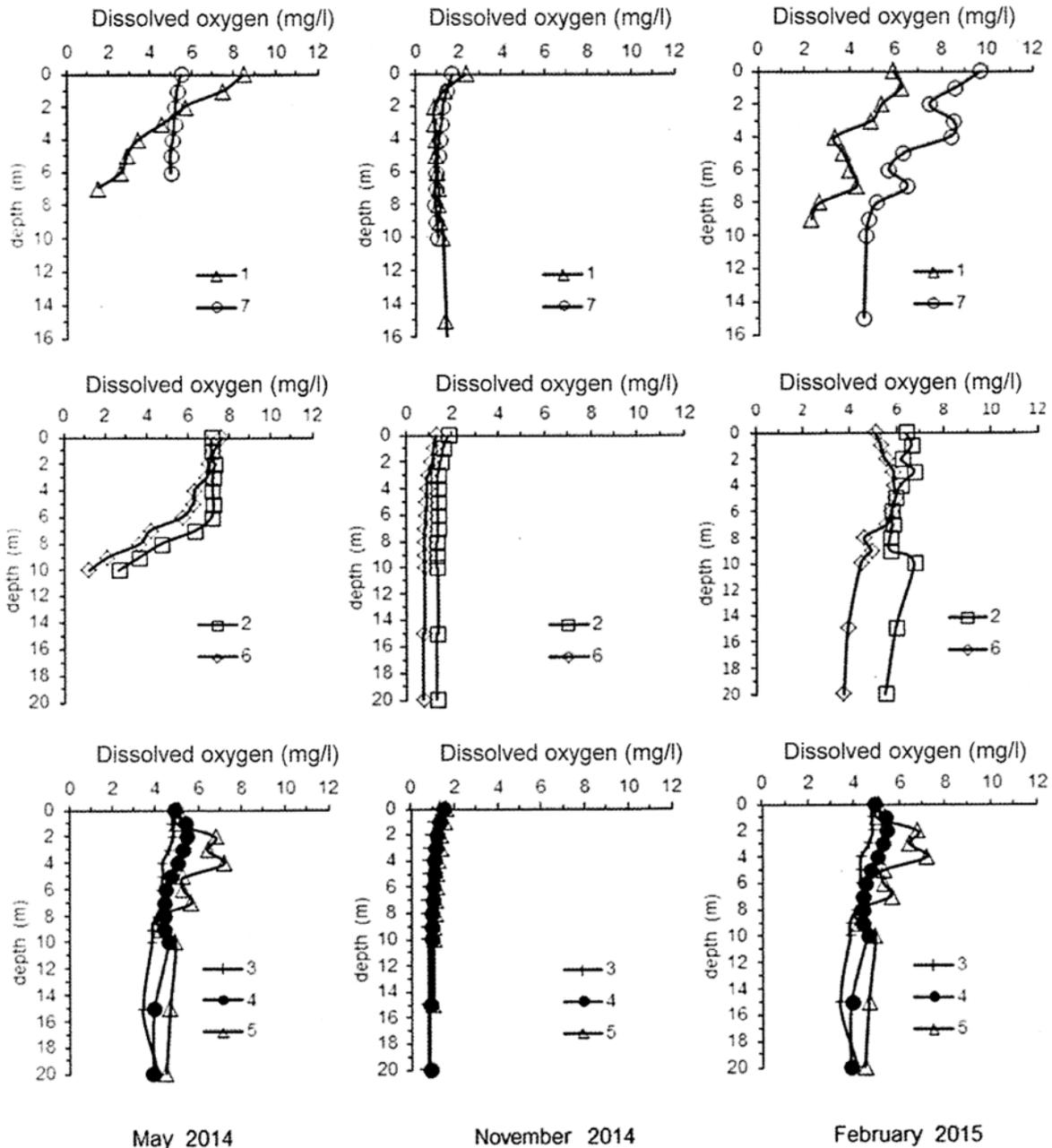


Figure 3. Dissolved oxygen (mg/l) profiles of lotic (1 and 7), transitional (2 and 6), and lentic (3, 4, 5) sites for May 2014, November 2014, and February 2015.

Secchi disk transparency (SDT)

As for DO, the SDT (Table 1) was also affected by the high wastewater volume input in Nov 2014. In May 2014, at the beginning of the rainy season, lotic sites 1 and 7 showed the lowest SDT, 0.52 and 1.15 m, respectively, due to storm runoff which is the primary source of suspended material in the water bodies (Kemdirim, 2005). The SDT increased at the transition sites 2 and 6, to 5.90 m and 2.10 m, respectively, due to the sedimentation of suspended particles caused by a depth increase and width of river channels in those sites (Figure 1), and consequently a decrease in river current speed. The deeper lentic zone of the reservoir, which allows precipitation of suspended matter, always presented SDT values higher than 5.60 m.

pH

The mean pH of surface water was 8.40 in May 2014 and diminished to 7.90 and 7.12 in Nov 2014 and Feb 2015, respectively (Table 1). In May 2014, the whole surface water presented a homogeneous basic pH due to the system's primary productivity, influenced by high solar irradiation and temperature. The pH decrease in Nov 2014 and Feb 2015 (Figure 4A) was due to less primary productivity and an increase in DOC that increased CO₂ concentration through its chemical and biochemical degradation (Roldán-Pérez & Ramírez-Restrepo, 2008). Zimapan basin with carbonate-rich limestone rocks influenced the reservoir pH values, ranging between 6.96 and 8.40 (Table 1). Our pH was similar to those in

Aguamilpa dam, Nayarit state, 6.46-8.43 (Rangel-Peraza & González-Farias, 2013), and in Danxhó dam, State of Mexico, 6.90-8.90 (Oliva-Martínez, Ramírez-Martínez, Garduño-Solórzano, Cañetas-Ortega, & Ortega, 2005).

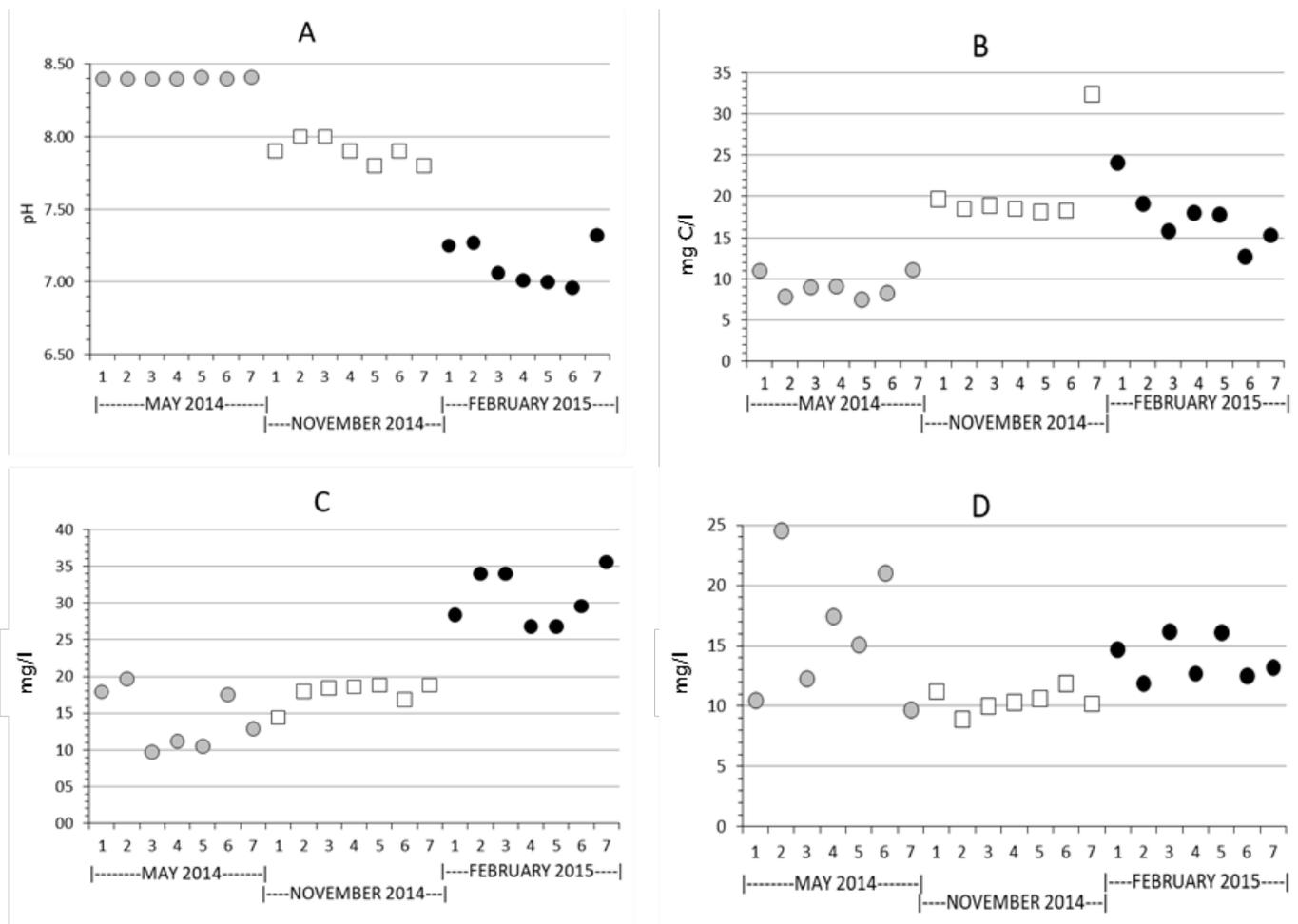


Figure 4. Surface profiles of: A) pH; B) dissolved organic carbon (mg/l); C) total nitrogen (mg/l); and D) total phosphorus (mg/l) in all sampling sites (1 to 7) in May 2014, November 2014 and February 2015.

Electrical conductivity (EC)

The reservoir presented a significant variation of EC mean values through time, 747 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in May 2014, 48 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Nov 2014, and 1 268 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Feb 2015 (Table 1). EC variations at the lotic sites 1 and 7 always presented significant differences among them and in depth. The increase in EC in Feb 2015 was due to the entrance through sites 1 and 7 of N residues of fertilizers applied in the irrigation districts DR003 (Tula River) and DR023 (San Juan River) (Sagarpa, 2015) was reflected in the high concentration of TN in the reservoir (Figure 5C).

	C1	C2
DO (mg/L)	0.51486	0.20172
T (C)	0.37133	- 0.13675
EC (uS/cm)	0.35460	0.52531
SDT (mg)	0.26545	- 0.39888
TN (mg/l)	- 0.01464	0.67424
TP (mg/l)	0.42041	- 0.04505
DOC (mg/l)	- 0.47315	0.22120

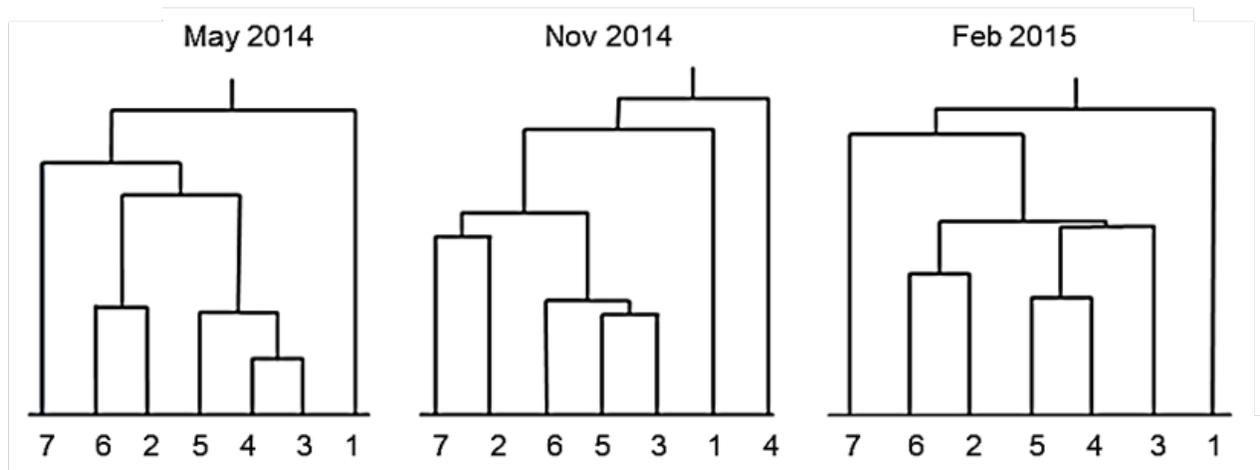
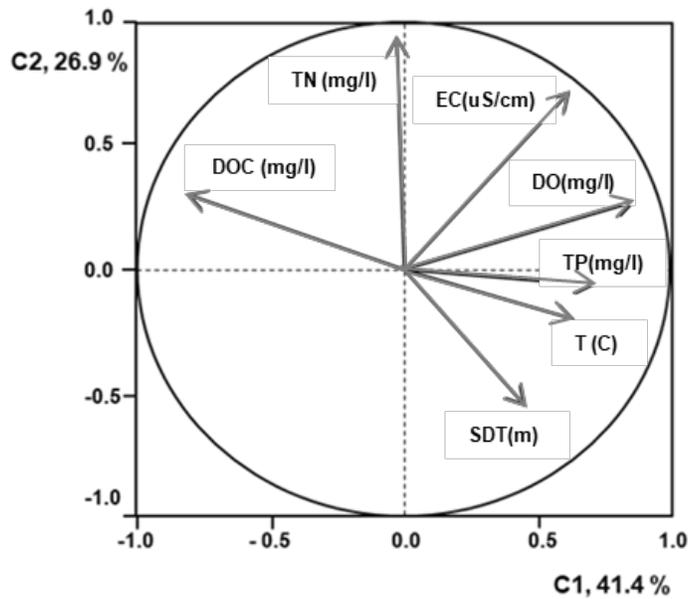


Figure 5. Hydrological similarity dendrogram Bray-Curtis Index on top, and principal component analysis (PCA) at the bottom.

The rest of the sites (2, 3, 4, 5, and 6) presented almost equal EC values through time and depth, probably due to water column homogenization caused by wind and currents generated by dam gates' water release. The EC range of values for Zimapan, 34.0-1700 $\mu\text{S/cm}$

(Table 1), was similar to Chapala wetland values, 27.4-1570 $\mu\text{S}/\text{cm}$, which receives high volumes of agricultural drains (Chávez-Alcántara *et al.*, 2011).

Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP)

TN and TP concentrations for all samples were consistently higher than 9.7 and 8.9 mg/l, respectively (Table 1), so this reservoir is hypereutrophic (Smith, Tilman, & Nekola, 1999; Cunha *et al.*, 2013). The highest TN and TP concentrations were measured in Feb 2015 at Station 7 (35.60 mg/l) and May 2014 at Station 2 (24.61 mg/l), respectively (Figures 4C, 4D). Those high concentrations in the reservoir are due to wastewater input from Mexico and San Juan cities and agricultural drainage of fertilizers applied in the irrigation districts DR003-Tula and DR-023 San Juan (Pérez-Díaz *et al.*, 2018; Sagarpa, 2015; Saldaña-Fabela, Díaz-Pardo, & Gutiérrez-Hernández, 2011). Zimapan reservoir, like other eutrophic ecosystems, presents a severe degradation in water quality in times of heat and drought, with frequent cyanobacterial blooms of *Microcystis* sp. and *Anabaena* sp. (López-Hernández, Ramos-Espinosa, Figueroa, & Carranza-Fraser, 2007; Montelongo-Casanova *et al.*, 2008; Conley *et al.*, 2009).

Dissolved organic carbon (DOC)

The origin of DOC in a water body can be autochthonous or allochthonous, carried by rivers, runoffs, and industrial, municipal, and residual agricultural waters. The mean concentrations of DOC were consistently higher than 9.11 mg/l; Nov 2014 presented the highest concentration (32.43 mg/l) (Table 1, Figure 4B). Variation of DOC in the reservoir depends on the wastewater inputs through the rivers at the lotic sites 1 and 7, and by the exportation through the dam penstocks when hydropower is required.

A hydrological similarity dendrogram Bray-Curtis Index (Figure 5) of the sampling sites presented equal similarity group distribution for May 2014 and Feb 2015 and for Nov 2014. There was a slight group change with site 4, where the control of the hydroelectric penstocks strongly influences the dynamics of the water; however, despite the slight difference in Nov 2014, we consider that the sites grouped as expected, i.e., lotic (sites 1 and 7), transitional (sites 2 and 6) and lentic (sites 3, 4 and 5).

Applying the PCA (Bartholomew, 2010) for the sampling period, the reservoir presented two main components that together explain 68.3 % of the variability in the original data (Figure 5); in component 1, there are DO and EC, and in component 2, DOC and TN. Concerning the PCA, the parameters in component 1 (DO and EC) and those in component 2 (DOC and TN) confirmed that the water quality responds to the entry of organic matter (N and P organic compounds), and similar dynamics are reported in other reservoirs (Geraldés & Boavida, 2004).

According to the ANOVA performed on the PCA components, the reservoir surface water presented a considerable variation of water quality parameters among the seasons compared with no spatial variations among the sampling sites (except EC, which presented both season and sites' significant variations). MANOVA with the Wilks test (95 % confidence) applied to months versus sampling sites showed significant differences for the months ($p = 0.000027$) and no differences for sampling sites; seasonal variation was significant, not so for spatial variation. Tukey contrast confirmatory test ($p = 0.05$ significance) showed us those significant differences among the months in detail. Seasonal differences were significant for DO and EC for all sampled months, TN differences were also significant in May-Feb and Nov-Feb, and DOC differences were in May-Nov and May-Feb. The T presented the difference only between May-Nov. No significant seasonal differences between SDT and TP.

Discussion

The physicochemical variations in the Zimapan reservoir are influenced by high and low air temperature, wind, dry and rainy conditions, and the depuration process along the Tula River caused by a cascade dams system (five reservoirs), spring waters, and physical aeration by rocks and permanent lotic conditions throughout the river.

The system is also affected by anthropogenic actions (Gerson, Costa-de-Azevedo, & Ferreira, 2011), the most important being the input of wastewater and the intermittent discharge of large volumes of water ($\sim 60 \text{ m}^3/\text{s}$) through the hydroelectric penstocks (Bravo-Inclán, Saldaña-Fabela, & Sánchez-Chávez, 2012). Simultaneously, the most critical

anthropogenic impact was the municipal and agricultural sewage input that promotes nutrient enrichment in the reservoir with significant quantities of N, P, organic matter, and coliform microorganisms (Janssen *et al.*, 2017). The environmental parameters influencing water quality are seasonal rains (direct input and runoff), solar irradiance, winds, and temperature.

The epilimnion is at 2 m in May and 5 m in February; considering the surface to 70 m depth, the hypolimnion occupies more than 80 % of the total water column. So fisheries activities are able only in 0-20 m depth.

In warmer months, the thermally stratified water column presented epilimnion with T around 25 °C. Appropriate DO values for aquatic life (> 4 mg/l) in epilimnetic surface waters in May and February. In comparison, the hypolimnion (≥ 20 m depth) presented T lower than 20 °C (Figure 2) and DO values of hypoxia (2 mg/l) or anoxia (0-1 mg/l) (Figure 3), like other reservoirs (Rangel-Peraza *et al.*, 2012; Nishimoto & Mawatari, 2009). Throughout our sampling period, the bottom water mass below 50 m depth never mixed with the upper water layer, so we consider the system to be meromictic (Bravo-Inclán *et al.*, 2012).

The fact that DO in epilimnion remained around 5 mg/l in May 2014, and Feb 2015 implies that the reservoir surface water was suitable for fish farming, mainly tilapia, as suggested by Ruiz-Velazco-Arce, Tapia-Varela, García-Partida and González-Vega (2006), but unsuitable in Nov 2014 when hypoxia (DO < 2 mg/l) dominates the whole systems and can lead to massive fish kills in combination with extreme flood conditions like the year 2002 (López-Hernández *et al.*, 2007). Fish kills in dams happen due

to parasites, anoxic waters, cyanobacteria, and in the hypolimnion, releasing methane, hydrogen sulfide, and ammonia (Rangel-Peraza *et al.*, 2012).

Bravo-Inclán *et al.* (2012) reported a maximum SDT in May 2005 of 5.67 m between sites 4 and 5. Our results are similar to those obtained for other water bodies in Mexico, like Lake Chapala (De Anda *et al.*, 1998) and the Aguamilpa hydroelectric dam (Rangel-Peraza & González-Farias, 2013). In Nov 2014, SDT was affected by high primary productivity reported for previous years (Bravo-Inclán *et al.*, 2012) and the residual runoffs after the rains.

In Feb 2015, the SDT mean value was 2.56 m (Table 1), with the highest value of 3.41 m at site 3 and the lowest at 1.21 m at site 7. In that month, the SDT was affected by the suspended matter carried by the residual waters of Mexico and San Juan del Río cities, and also from agriculture residual waters of the irrigation districts DR003-Tula (50 104 ha irrigated with 928.1 Mm³) and DR023-San Juan del Río (9 336 ha irrigated with 80.6 Mm³), that discharge irrigation waters of the autumn-winter crops in the Tula and San Juan rivers, respectively (Conagua, 2018).

Considering that the Zimapan reservoir is a drainage lake with the central water outflow through the turbines, the variable electric demand for this hydroelectric plant will affect the hydrology and the distribution (location and depth) of physicochemical parameters in the system. Janssen *et al.* (2019) showed that lake or reservoir restoration depends on spatial nutrient loading and hydrology aspects. In our case, the organic matter, nutrients, and solids input is through the San Juan and Tula Rivers

(sites 1 and 7), so the water outflow manipulation will affect their distribution and concentration, affecting fish farming in the reservoir. In concordance with Janssen *et al.* (2019), continuous flushing of the Zimapan reservoir through the hydroelectric plant turbines might improve water quality, avoiding the concentration of allochthonous pollutants supporting tilapia and black bass aquaculture.

Conclusions

The Zimapan reservoir is a system affected by important volumes of organic matter, nutrients, and solids transported in the Tula River and San Juan River, which promotes nutrient enrichment in the reservoir, conductivity, turbidity, pH, and, dissolved oxygen gradients; contamination must be high because the rivers receive urban, industrial and agriculture sewage with no treatment.

The system is a tropical meromictic hypereutrophic system that presents seasonal water physicochemical dynamics, with no spatial variation among the sampling sites. The spatial distribution of the different measured parameters is controlled by balancing the wastewater from Mexico and San Juan cities and the output through the hydropower penstocks. Fish farming in the reservoir takes place most of the year, except at the end of autumn after the rainy season (Nov 2014), due to the hypoxic/anoxic conditions in the epilimnion caused by an input increase of DOC and probably a smaller volume of water expelled by the turbines.

With the knowledge of the limnological dynamics of the water masses (epilimnion, metalimnion, hypolimnion) of the physicochemical parameters studied and in particular in the concentrations of dissolved oxygen and inorganic nutrients, there are bases so that decision-makers can prevent the danger to the health of fish and humans from the neurotoxic and neuropathic substances released by cyanophyte microalgae during algal blooms in dry months.

The physicochemical conditions of the Zimapán dam water are related to environmental changes in the semiarid climate of this region; likewise, they allow inferences about the species of fishing importance that can be cultured in cages, as well as the appropriate selection of sites for this fishing activity.

Acknowledgments

To the fishermen's cooperatives of the Zimapán reservoir for their invaluable support in the field and for sharing environmental information, also to the Laboratorio de Química Ambiental, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México and the Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, for financing the study.

References

Alcocer, J., & Bernal-Brooks, F. W. (2010). Limnology in Mexico. *Hydrobiologia*, 644, 15-68.

- APHA-AWWA-WPCF. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (19th ed.). Washington, DC, USA: American Public Health Association.
- Bartholomew, D. J. (2010). Principal components analysis. In: *International Encyclopedia of Education* (3rd ed.) (pp. 374-377). DOI: 10.1016/B978-0-08-044894-7.01358-0
- Bravo-Inclán, L., Saldaña-Fabela, M. P., & Sánchez-Chávez, J. J. (2012). Evaluación ambiental del estado trófico y toxicidad en el embalse Zimapán, México. In: Pica-Granados, Y., & Ramírez-Romero, P. (eds.). *Contributions to the knowledge of ecotoxicology and environmental chemistry in Mexico* (pp. 105-117). Jiutepec, Mexico: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad. (1994). *Zimapán Hydroelectric Dam development project* (internal document). Mexico City, Mexico: Comisión Federal de Electricidad.
- Chávez-Alcántara, A., Velázquez-Machuca, M., Pimentel-Equihua, J., Venegas-González, J., Montañez-Soto, J. L., & Vázquez-Gálvez, G. (2011). Hydrochemistry of the surface waters of the Chapala swamp and water quality index. *Terra Latinoamericana*, 29, 83-94.
- Climate-Data. (2020). *Climograph of Arenal, Hidalgo, Mexico*. Recovered from <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/hidalgo/el-arenal-335143>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *The dams of Mexico are a national heritage that gives life, energy, and protection. We are Comisión Nacional del Agua*. Mexico City, Mexico: Comisión Nacional del Agua.

- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Agricultural statistics of irrigation units*. Recovered from <https://files.conagua.gob.mx//publicaciones/Publicaciones/SGIH-3-18.pdf>
- Conley, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. E., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot, C., & Likens, G. E. (2009). Controlling eutrophication. *Science*, 323, 1014-1015.
- Coplain Ingenieros Civiles S.A de C.V. (1985). *Estudio de la calidad y clasificación del agua en el río Tula*. México, DF, México: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Secretaría de Ecología, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, General de Consultores en Planeación e Ingeniería.
- Costa, M., Attayde, J. L., & Becker, V. (2016). Effects of water level reduction in the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid lakes. *Hydrobiologia* 778, 75-89.
- Cunha, D. G., Calijuri, M. C., & Lamparelli, M. C. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tr}). *Ecological Engineering*, 60, 126-134.
- De Anda, J., Quiñones-Cisneros, S. E., French, R. H., & Guzmán, M. (1998). Hydrologic balance of Lake Chapala. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 1319-1331.
- De Anda, J., & González-Farías, F. (eds.). (2013). *Water quality in the Aguamilpa dam, Nayarit, Mexico*. Guadalajara, Mexico: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.

- De Anda, J., & Shear, H. (2013). Chapter II. The dams on the Santiago River. In: De Anda, J., & González-Farías, F. (eds.). *Water quality in the Aguamilpa dam, Nayarit, Mexico* (pp. 43-62). Guadalajara, Mexico: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco
- Delazari-Barroso, A., Barroso, G. F., Huszar, V. L. M., & Oliveira, S. M. (2009). Physical regimes and nutrient limitation affecting phytoplankton growth in a mesotrophic water supply reservoir in southeastern Brazil. *Lakes & Reservoir Research Management*, 14, 269-278.
- Fontana, L., Albuquerque, A. L. S., Brenner, M., Bonotto, D. M. Sabaris, T. P. P., Pires, M. A. F., Cotrim, M. E. B., & Bicudo, D. C. (2014). The eutrophication history of a tropical water supply reservoir in Brazil. *Journal Paleolimnology*, 5, 29-43.
- García-Amaro, E. (2004). *Modifications to the Köppen climate classification system* (5a ed.). Mexico City, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Geraldes, A. M., & Boavida, M. J. (2004). Limnological variations of a reservoir during two successive years: One wet, another dry. *Lakes & Reservoirs Research Management*, 9, 143-15.
- Gerson, F. A., Costa-de-Azevedo, M. A., & Ferreira, M. N. (2011). Seasonal changes and spatial variation in the water quality of a eutrophic tropical reservoir determined by the inflowing river. *Lake and Reservoir Management*, 27, 343-354.

- Janssen, A. B. G., De Jager, V. C. L., Janse, J. H., Kong, X., Liu, S., & Ye, Q. (2017). Spatial identification of critical nutrient loads of large shallow lakes: Implications for Lake Taihu (China). *Water Research*, 119, 276-287.
- Janssen, A. B. G., van Wijk, D., Luuk-van-Gervena, P. A., Bakker, E. S., Brederveld, R. J., De Angelis, D. L., Janse, J. H., & Mooij, W. M. (2019). Success of lake restoration depends on spatial aspects of nutrient loading and hydrology. *Science Total Environment*, 679, 248-259.
- Kazi, T. G., Arain, M. B., Jamali, N., Afridi, H. I., Sarfraz, R. A., & Baig, J. A. (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 301-309.
- Kemdirim, E. C. (2005). Studies on the hydrochemistry of Kangimi reservoir, Kaduna State, Nigeria. *African Journal Ecology*, 43, 7-13.
- López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G., Figueroa, T. M., & Carranza-Fraser, J. (2007). Zimapán dam: Environmental, fisheries, and social implications. In: *De-la-Lanza, E. G. (comp.). Mexico's inland waters: Concepts and cases* (pp. 496-516). México, DF, México: AGT Editor.
- Leira, M., & Cantonati, M. (2008). Effects of water-level fluctuations on lakes: An annotated bibliography. *Hydrobiologia*, 613, 171-184. DOI: 10.1007/978-1-4020-9192-6_16

- Montelongo-Casanova, R., Gordillo-Martínez, A., Otazo-Sánchez, E., Villagómez-Ibarra, J., Acevedo-Sandoval, O., & Prieto-García, F. (2008). Modeling of the quality of water of river Tula, State of Hidalgo, Mexico. *Dyna*, 75, 5-18.
- Nishimoto, N., & Mawatari, K. (2009). Restoration of hypolimnetic dissolved oxygen through light irradiation-induced periphyton production. *Lakes & Reservoirs Research Management*, 14, 163-169.
- Oliva-Martínez, M. G., Ramírez-Martínez, J. G., Garduño-Solórzano, G., Cañetas-Ortega, J., & Ortega, M. (2005). Diatoms of three bodies of water from wetlands Jilotepec-Ixtlahuaca, Estado de Mexico. *Hidrobiológica*, 15, 1-26.
- Pérez-Díaz, J. P., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, E. I., Can-Chulim, A., & Mancilla-Villa, O. (2018). Nitrate, phosphate and boron content in wastewater for crop irrigation in Mezquital Valley, Hidalgo. *Nova Scientia*, 10, 97-119. DOI: 10.21640/ns.v10i21.1478
- Randell-Badillo, J. (2008). *Regional territorial ecological planning in the municipalities where the Los Mármoles National Park is located. Informe Final. Parte 2*. Pachuca de Soto, Mexico: Gobierno del Estado de Hidalgo, Consejo Estatal de Ecología.
- Rangel-Peraza, J. G., Obregón, O. J., Nelson, G. P., Williams, J., De Anda, J., González-Farías, F., & Miller, J. (2012). A modeling approach for characterizing thermal stratification and assessing water quality for a large tropical reservoir. *Lakes & Reservoirs Research and Management*, 17, 119-129.

- Rangel-Peraza, J. G., & González-Farías, F. A. (2013). Chapter VII. Analysis of water quality data. In: De Anda, J., & González-Farías, F. A. (eds). *Water quality in the Aguamilpa dam, Nayarit, Mexico*. Guadalajara, Mexico: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
- Roldán-Pérez, G., & Ramírez-Restrepo, J. J. (2008). *Fundamentals of Tropical Limnology* (2nd ed.). Antioquía, Colombia: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Corporativa, Universidad de Antioquía.
- Rubio-Franchini, I., López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G., & Rico-Martínez, R. (2016). Bioaccumulation of metals As, Cd and Pb in zooplankton and fishes from the Tula river watershed, Mexico. *Water Air Soil Pollution*, 227, 5. DOI: 10.1007/s11270-015-2702-1
- Ruiz-Velazco-Arce, J. M. J., Tapia-Varela, R., García-Partida, J. R., & González-Vega, H. (2006). Evaluation of a semi-intensive culture of tilapia (*Oreochromis niloticus*) in circular tanks with hot springs. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 8, 1-12.
- Sagarpa, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca. (2015). *Agenda técnica agrícola de Hidalgo*. Mexico City, Mexico: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca.
- Saldaña-Fabela, M. P., Díaz-Pardo, E., & Gutiérrez-Hernández, A. (2011). Diagnosis of water quality in a cascade reservoir system, San Juan river basin, Querétaro, Mexico. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 115-126.

- Sigala, I., Caballero, M., Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Vázquez, G., Pérez, L., & Zawisza, E. (2017). Basic limnology of 30 continental water bodies of the transmexican volcanic belt across climatic and environmental gradients. *Boletín Sociedad Geológica Mexicana*, 69, 313-370.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100, 179-196.
- Thornton, K. W. (1990). Perspectives on reservoir limnology. In: Thornton, K. W., Payne, F. E., & Kimmel, B. L. (eds.). *Reservoir limnology: Ecological perspectives* (pp. 1-14). New York, USA: Wiley-Interscience.
- Thornton, J. A., & Rast, W. (1993). A test of hypotheses relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes. In: Straskraba, M., Tundisi, J. G., & Duncan, A. (eds.). *Comparative reservoir limnology and water quality management* (pp. 1-24). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Torres-Orozco, B. R. E., & Zanatta, S. A. (1998). Species composition, abundance, and distribution of zooplankton in a tropical eutrophic lake: Lake Catemaco, Mexico. *Revista Biología Tropical*, 46, 285-296.
- World Commission on Dams. (2000). *Dams and development – A new framework for decision-making. Report*. London, UK: Earthscan.

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-10

Artículos

Política hídrica en Veracruz, una mirada desde la coherencia vertical, la transparencia y el alfabetismo hídrico

Water policy in Veracruz, a view from the perspective of vertical coherence, transparency, and water literacy

María del Carmen Maganda-Ramírez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8479-1556>

María del Socorro Aguilar-Cucurachi², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9644-7186>

Julia Ros-Cuellar³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9201-5968>

María del Socorro Lara-López⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1708-850X>

Georgina Vidriales-Chan⁵, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1313-7240>

Miriam G. Ramos-Escobedo⁶, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3650-394X>

¹Red Ambiente y Sustentabilidad, Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Xalapa, Veracruz, México, carmen.maganda@inecol.mx

²Dirección de Comunicación de la Ciencia, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México, socaguilar@uv.mx



³Department of Environment, Agriculture and Geograph, Bishop's University, Quebec, Canada, julia.ros.cuellar@gmail.com

⁴Consultora independiente, Xalapa, Veracruz, México, cocasan@gmail.com

⁵Sendas A.C., Tlalnahuayocan, Veracruz, México, georgina.vidriales@sendasac.org

⁶Global Water Watch México, Xalapa, Veracruz, México, miriam.ramos.gww@gmail.com

Autora para correspondencia: María del Carmen Maganda-Ramírez, carmen.maganda@inecol.mx

Resumen

Este artículo tiene como objetivo 1) presentar una compilación actualizada del material legislativo y normativo en materia de política hídrica, planes de desarrollo y programas regionales del agua del nivel nacional al estado de Veracruz, México, con el fin de 2) analizar la coherencia vertical de la política hídrica en dos niveles de gobierno: nacional y estatal en el periodo 2019-2022; así como 3) reforzar la importancia de la transparencia de información bajo el enfoque del alfabetismo hídrico. A manera de una línea del tiempo, presentaremos los resultados de una profusa investigación documental sobre diversas leyes e instrumentos de planeación, al igual que un mapeo de los instrumentos de política pública y organismos con atribuciones en cada nivel de gobierno. Esta compilación pretende llenar el vacío informativo temporal y de contenido

en la materia, y documentar y analizar la coherencia vertical de las leyes, planes y programas hídricos oficiales emitidos en el periodo citado.

Palabras clave: agua y desarrollo, alfabetismo hídrico, políticas públicas, estado de Veracruz, política hídrica mexicana.

Abstract

This article aims to 1) present an updated compilation of legislative and regulatory material on water policy, development plans, and regional water programs from the national level to the state of Veracruz, Mexico, in order to 2) analyze the vertical coherence of water policy at two levels of government: national and state ones in the specific period 2019-2022; as well as 3) reinforce the importance of water literacy, based on information transparency. We will present the results of extensive documentary research on various laws and planning instruments in a timeline fashion, including a mapping of the public policy instruments and central organizations acting in each government level. The presentation of this compilation aims to fill the information gap of time and content, but it will also allow to document and analyze the vertical coherence of recent water laws, plans and official programs.

Keywords: Water and development, water literacy, public policies, state of Veracruz, Mexican water policy.

Recibido: 05/07/2023

Aceptado: 26/01/2024

Publicado *online*: 29/02/2024



Introducción y propuesta conceptual

La política hídrica en México es un tema del que nos informamos de modo escaso, pese a su relevancia para toda la ciudadanía. Por años, la planeación hídrica, las asignaciones de concesiones, derechos y vedas de extracción fueron materia de especialistas con limitada información y participación social (Wilder, Austria, Romero, & Ayala, 2020). El tema de la desinformación en materia de agua es estudiado de forma destacada por Otaki, Sakura y Otaki (2015), a partir del término: "alfabetismo hídrico" (*water literacy*), que se define como la capacidad de sentirse familiarizado con conocimientos sobre el agua, involucrarse de manera activa y enfrentar el tema del agua como asunto propio. McCarroll y Hamann (2020) sugieren que alfabetizarse sobre temas de agua cubre un amplio campo de conocimientos que inicia desde preescolar y cuya adquisición continúa de por vida, y que tiene que ver en algunos casos con el saber científico, conocimiento hidrosocial y conocimiento local (Figura 1); este último incluye el conocimiento limitado sobre leyes y normatividad en materia de agua. En dicho contexto proponemos fortalecer el alfabetismo legislativo y normativo en materia de agua dentro del alfabetismo hídrico; es decir, la importancia de incluir estos aspectos en las iniciativas formales e informales de la educación sobre agua. El fin último es que la ciudadanía tenga acceso y esté informada sobre aspectos legales y cómo aplicarlos a través de los planes y programas de la política hídrica, así como los vacíos existentes en los ámbitos nacional, estatal y local.

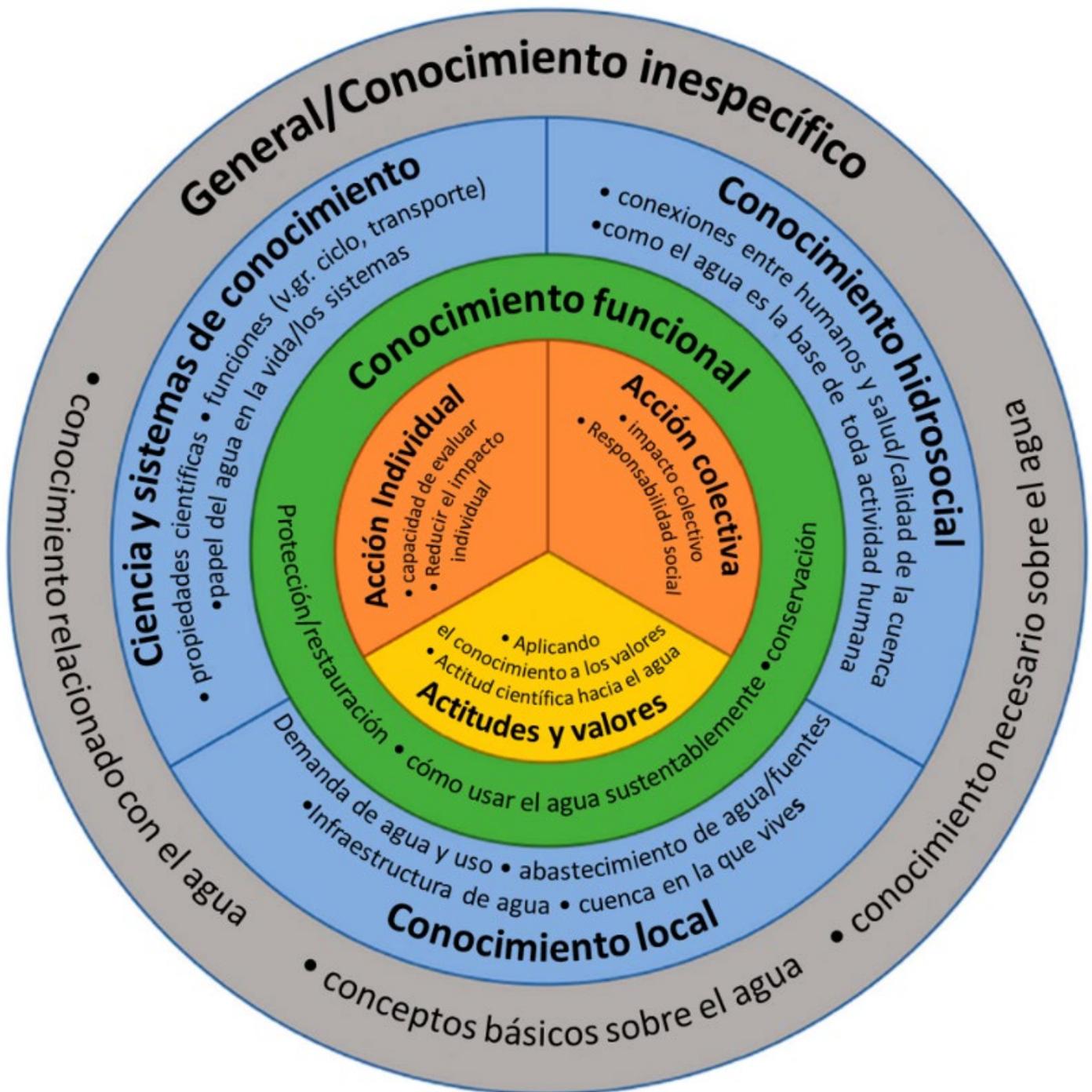


Figura 1. Conocimientos relacionados con el agua. Traducido de McCarroll y Hamann (2020).

En México, la última década ha marcado una clara diferencia con el surgimiento de iniciativas ciudadanas, como la Coordinadora Agua para Todxs, Agua para la Vida (2014), organización enfocada en la socialización y la democratización del tema agua en el país, y promotores de la Iniciativa Ciudadana de la Ley General de Aguas (ICLGA) en 2020. Si bien la información y participación han comenzado a fluir hacia diferentes sectores sociales, persiste un vacío informativo en materia legislativa y de planeación hídrica en los tres niveles de gobierno. El primer objetivo de este artículo es presentar una compilación actualizada del material legislativo y normativo en materia de política hídrica del nivel nacional y del estado de Veracruz durante el periodo 2019-2022. Este periodo se seleccionó para documentar la situación y política hídrica en la actual administración a través de tres enfoques particulares: la coherencia vertical de políticas públicas (segundo objetivo), y la transparencia y alfabetismo hídrico (tercer objetivo).

Coherencia vertical

La coherencia vertical es una herramienta de análisis de políticas públicas que compara las leyes federales y estatales, reglamentos, programas y planes dentro de los sectores. Consiste en la identificación de actores institucionales, sus programas y acciones en la política pública (hídrica en este caso) en los niveles federal, estatal y local, y el análisis de sus relaciones entre actores e instituciones. Este análisis no critica a las políticas como inadecuadas o ineficientes, sino que identifica puntos específicos de (in)coherencias verticales debido a las diferencias entre los

enfoques nacionales y estatales (Koff, Challenger, & Portillo, 2020). Este enfoque abre un espacio de oportunidad donde los tomadores de decisiones pudieran intervenir para fortalecer la coherencia de políticas públicas para el desarrollo sostenible (Hernández-Huerta, Pérez-Maqueo, & Equihua, 2018). Para el presente artículo, este marco nos permitió observar la alineación y coherencia de la política hídrica en dos niveles de gobierno: nacional y estatal en el periodo específico 2019-2022.

Transparencia, acceso a la información y alfabetismo hídrico

El planteamiento de la alfabetización hídrica legislativa y normativa incluye una vinculación inherente con temas de transparencia y acceso a la información. En México, el artículo 6° letra A de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM, 2021) establece dar acceso a las personas en los ámbitos federal, estatal y municipal a la información pública y transparente. Este derecho es una facultad de la ciudadanía para poder investigar y obtener toda la información que genera, administra o está en poder de cualquier instancia que reciba recursos públicos (Olvera-Molina, Seguin-Tovar, & Sepúlveda-Toledo, 2019). Si bien la Ley de Aguas Nacionales (LAN, 2019) no señala de modo explícito el acceso a la información, la transparencia y rendición de cuentas en la materia, existe la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública (2016 con modificaciones en 2017 y 2021) que garantiza el derecho de acceso a la información de cualquier instancia de los poderes Legislativo, Ejecutivo y Judicial, las entidades federativas y los municipios (Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública, 2021).

Así, en materia de agua y saneamiento, los sujetos obligados (instituciones, dependencias gubernamentales) deben transparentar y rendir cuentas por el ejercicio de recursos públicos federales, estatales o municipales, como es el caso de los organismos operadores de agua y saneamiento, o las comisiones estatales de agua. Las entidades comunitarias, como los grupos de gestores locales del agua, no son reconocidas legalmente. México todavía enfrenta retos de rendición de cuentas transparentes y datos abiertos para que los ciudadanos se informen de forma oportuna de asuntos relacionados con el agua (Sepúlveda, 2021). Generalmente, la información hídrica nacional es parcial y/o carece de claridad, lo que inhibe de cierta manera la participación ciudadana en las decisiones sobre un bien público fundamental (Fuentes-Martínez, 2014). La sociedad civil organizada desempeña un papel crucial como mediadora entre actores institucionales y ciudadanía; su función respalda lo que llamamos “coherencia vertical de políticas públicas”, lo cual implica que existan leyes de transparencia y compromiso político necesario para poner a disposición del dominio público la información relevante.

El alfabetismo hídrico es un campo de estudio relativamente nuevo, con una importancia creciente en temas de la gestión sostenible del agua con equidad social (McCarroll y Hamann, 2020). Este concepto implica comprender de dónde viene, cómo se distribuye y trata el agua que usamos a diario, con qué calidad llega y regresa al ambiente, qué usos y significados tiene para la población (Figura 1). El alfabetismo hídrico tiene como antecedente una gran diversidad de debates científicos con términos similares como “educación/concientización sobre el agua”, “conocimiento generalizado del agua”, “percepciones y actitudes sobre el

agua” o “sensibilización”, en el contexto de cambios de comportamientos en favor del medio ambiente (rare.org, 2023). Tales conceptos contribuyen al análisis del conocimiento, creencias o saberes ciudadanos asociados con el agua, tan valiosos como los conocimientos técnicos sobre hidrología, aunque con menor uso e impacto en la toma de decisiones.

De acuerdo con Otaki *et al.* (2015), la alfabetización del agua es la capacidad de familiarizarse, involucrarse de manera activa y enfrentar los problemas relacionados con el agua como un problema propio. El concepto de alfabetismo hídrico proyecta un sistema incluyente, con potencialidad de que la población interactúe conscientemente con el agua en su vida cotidiana o “convivir con el agua en sociedad”; Besteiro (2020) lo llama “conocimiento hidrosocial”, diversificado de acuerdo con la forma de vida y costumbres locales.

Otaki *et al.* (2015) proponen la siguiente categorización de alfabetismo hídrico: 1) alfabetización práctica, que significa tener el conocimiento para asegurar la cantidad vital y calidad del agua, e incluye aspectos como saber no beber agua insalubre y comprender la importancia del lavado de manos; 2) alfabetización sobre el agua viva, esto es, la capacidad de utilizar el agua en el hogar y el espacio social (tanques limpios, uso eficiente de fosa séptica...); 3) alfabetización social del agua, que refiere a la voluntad de actuar responsablemente y tomar decisiones razonables para la sociedad. Para encontrar soluciones óptimas a la problemática hídrica en la sociedad moderna, es necesario pensar desde el punto de vista de la política, la economía, la sociedad como conjunto, la tecnología y el medio ambiente. Por tanto, este artículo propone una cuarta categoría, estrechamente vinculada con la transparencia: alfabetización legislativa y normativa, referida a la

relevancia de que la ciudadanía tenga el acceso y esté informada de los planes y programas de la política hídrica tanto a nivel nacional como local (de preferencia). En ese sentido, es fundamental comprender el lenguaje utilizado, para tener la capacidad de coadyuvar a su implementación, y detectar incoherencias y vacíos entre los instrumentos de los diferentes niveles de gobierno.

Diseño de investigación y metodología

Revisamos y analizamos los instrumentos normativos y de planeación relacionados con el tema del agua a diferentes escalas con incidencia en el estado de Veracruz; ello, para identificar objetivos, estrategias y acciones en cuanto a la gestión del agua en el periodo 2019-2022 (aunque la mayoría de documentos comprenden hasta 2024). Utilizamos tres enfoques para enmarcar el análisis: coherencia vertical de la política hídrica, transparencia y alfabetismo hídrico (en particular alfabetismo legislativo y normativo). Para cumplir con estos objetivos, analizamos documentos legislativos y normativos en materia de política hídrica con vigencia entre 2019 y 2024 (acorde con el actual periodo administrativo); así como cinco entrevistas semiestructuradas a exfuncionarios en la gestión hídrica estatal, combinado con el conocimiento experto de algunas coautoras y una búsqueda exhaustiva de la información en páginas web institucionales.

Los instrumentos normativos creados en México para la regulación y gestión del agua abarcan diferentes escalas de gestión que varían conforme su análisis vertical, e incluyen leyes, normas federales,

estatales, planes y programas y acuerdos municipales que citan las disposiciones relacionadas con la gestión, uso y manejo del agua.

Todos los instrumentos analizados derivan de la CPEUM, el instrumento de mayor rango en el sistema jurídico mexicano, que incluye los principios básicos de la gestión del agua. El artículo 27 establece el régimen de propiedad de los recursos hídricos en el país, donde todas las aguas son propiedad de la nación, pero también reconoce la posible transmisión de su dominio a los particulares (propiedad privada). Desde 2012, el artículo 4º reconoce el derecho humano al agua y saneamiento (DHAS), y el Estado mexicano se compromete a garantizar este derecho en términos de accesibilidad, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico de forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. A continuación presentamos de manera jerárquica los instrumentos aplicables al presente estudio.

Resultados. La política hídrica: de lo nacional a lo estatal

Leyes federales

La Ley Orgánica de la Administración Pública establece que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) administra, controla, protege, regula y vigila el aprovechamiento de cuencas y cuerpos de agua de propiedad nacional y sus zonas federales correspondientes (Artículo 32 Bis).

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) es el instrumento que rige los asuntos relacionados con el agua en México; sus disposiciones son aplicables a todas las aguas nacionales. Promulgada en diciembre de 1992, esta Ley ha sido sujeta a reformas. Durante la gestión de la llamada Cuarta Transformación en México (4T), la LAN fue modificada en enero de 2020, en particular el primer párrafo del artículo 120, respecto a las sanciones de la autoridad del agua, y una adición a la fracción (VI Bis) del artículo 88 Bis sobre requerimientos de materiales y técnicas biodegradables para las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua.

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) es un órgano administrativo desconcentrado de la Semarnat, regulado por la LAN y sus reglamentos, y por la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal y su Reglamento Interior (LAN artículo 9). La Conagua tiene por objeto:

“ejercer las atribuciones que le corresponden a la autoridad en materia hídrica y constituirse como el Órgano Superior con carácter técnico, normativo y consultivo de la Federación, en materia de gestión integrada de los recursos hídricos, incluyendo la administración, regulación, control y protección del dominio público hídrico” (DOF, 1992).

Aunque la LAN es la ley principal para el aprovechamiento y la administración de agua, existen otras leyes que tienen relación con la gestión, uso, aprovechamiento, manejo y cuidado de este recurso. Entre ellas están la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA); la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS); los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, y la Norma Oficial Mexicana (NOM) para el Caudal Ecológico, que atienden aspectos

relacionados con las cuencas y la recarga de los mantos freáticos, y los atributos de los ecosistemas acuáticos. Es relevante notar que los criterios ecológicos de calidad del agua no han sido actualizados desde hace más de 30 años. Este punto es importante, porque un manejo integrado del agua requiere de un referente actualizado para construir líneas base sobre los ecosistemas acuáticos. Por otro lado, las metodologías para estimar el caudal ecológico deben incorporar datos sobre la captación del agua de los manantiales y la extracción de agua desde los arroyos para abasto de las comunidades rurales y los márgenes de las ciudades en nano y microcuencas. En la Tabla 1 presentamos una lista en orden cronológico de leyes federales y su relación con el agua.

Tabla 1. Normatividad mexicana federal en materia de gestión del agua y cuencas hidrográficas en México.

Año	Ley/norma	Objeto y visión
Definiciones básicas, derechos y atribuciones sobre el agua como un bien al servicio del ser humano		
2004	LAN	Reforma del párrafo 5o, art. 27 constitucional. Excluye aguas pluviales y residuales, y deja confusión respecto a las aguas subterráneas (Burns & Moctezuma, 2013)
2012	CPEUM	Modificación del párrafo quinto del artículo 4º e introducción del párrafo sexto, que incluye el derecho a un ambiente sano y al "acceso y disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible"
2014	LAN	Adición del artículo 3, fracción LXI BIS. Definición de yacimiento geotérmico Reforma al artículo 18, párrafo 2, referente a reservas o veda de agua en el subsuelo Reforma al artículo 81 referente a concesiones y exploración geotérmica
2016	LAN	Modificaciones al artículo transitorio decimoquinto para reorganizar el orden de usos del agua y priorizar el uso doméstico

Año	Ley/norma	Objeto y visión
Administración del agua y participación social		
1992	LAN y su reglamento	LAN artículo 3, fracciones XV, XVI; artículo 13 Bis 3, y el Capítulo 3 de su Reglamento establecen la creación de los consejos de cuenca (CC) para la coordinación, concertación, apoyo, consulta y asesoría entre la Conagua y los diferentes usuarios del agua en el país. Ahí convergen los tres órdenes de gobierno, los usuarios particulares y las organizaciones de la sociedad de la respectiva cuenca hidrológica. Así, los CC canalizan la participación social, y operan desde un enfoque regional para facilitar acuerdos y consensos entre sus habitantes y las autoridades
Protección y conservación de los sistemas acuáticos y sus cuencas		
1988	LGEEPA Reformados 13/12/1996	Artículo 53. Criterios para la protección de los recursos naturales, incluidas cuencas hidrográficas y agua Artículo 88: y para el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos cuya protección compete a la sociedad civil y al estado. Artículos 93, 117 y 118: realizar, a través de la Semarnat, las acciones necesarias para evitar y, en su caso, controlar procesos de eutroficación, salinización y, en general, la contaminación en las aguas nacionales
1989	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua	CE-CCA-001/89 precisa los niveles de los parámetros y de las sustancias en el agua, o sus efectos (...) y sus niveles permisibles; las autoridades competentes podrán calificar a los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados (...), o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática
2010	NOM Caudal Ecológico	NMX-AA-159-SCFI-2012 contempla dentro de la LAN el caudal ecológico de los ríos como el escurrimiento base que debe existir para sostener la vida de los ecosistemas. Esta norma establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas para acotar la extracción de las aguas nacionales, establecer zonas de veda o declarar reservas de agua. Información útil para la toma de decisiones, u otorgar o negar concesiones y asignaciones de agua, así como permisos de descarga dentro de los lineamientos

Año	Ley/norma	Objeto y visión
2018	LGDFS	<p>Artículo 24. De acuerdo con lo previsto en la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, la Sader se coordinará con la Semarnat y con la participación de la Conagua (...), para (...) fomentar la (...) captación e infiltración de agua pluvial en terrenos forestales</p> <p>Artículo 25. La Conagua y la CFE establecerán coordinación con la Semarnat y Conagua, a fin de desarrollar acciones y presupuestos tendientes al manejo integral de las cuencas y para promover la reforestación de zonas (...) que beneficien la recarga de cuencas y acuíferos (...) en las cuencas hidrográficas (...)</p>
Límites permisibles y sanciones		
2019	Modificaciones Ley de Aguas Nacionales	Reformas al artículo 120 (infracciones y acciones administrativas), párrafos y fracciones relacionadas con las multas y sanciones específicas de acuerdo con las Unidades De Manejo Para La Conservación De La Vida Silvestre (UMA)

Fuente: elaboración y actualización propia con base en Vidriales (2016).

Como colofón a la Tabla 1 reconocemos que el instrumento NOM-001-Semarnat, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, fue actualizado en 2021 y complementaremos esta información en la sección Normas.

En México también existen diversas miradas opuestas a las leyes oficiales. Por ello debemos citar la existencia de la ICLGA, gestada desde una convergencia nacional de movilizaciones sociales y acciones colectivas por el agua, que desde 2012 conformaron la Coordinadora Nacional Agua para Todxs, Agua para la Vida. La ICLGA propone 12 consensos sobre instancias de gestión hídrica ciudadana y democrática,

así como diversos instrumentos para superar y dar alternativas a lo que denominan “dinámica de despojo hídrico”, con un régimen horizontal de concesiones, respeto a los pueblos originarios, ejidos y comunidades, a la naturaleza y economía del agua, entre otros (Cámara de Diputados, 2020). La Cámara de Diputados no ha logrado concretar el proceso de revisión de la ICLGA, y en noviembre de 2022, la Comisión de Recursos Hidráulicos, Agua Potable y Saneamiento solicitó a la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) una prórroga para cumplir con el mandato de expedir la ICLGA y hacerlo efectivo en el próximo periodo de sesiones.

Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2019-2024

Este plan aborda el tema del agua de manera implícita sin definir una estrategia específica con acciones a implementar para el manejo y la gestión del agua; solo cita algunos de los programas estratégicos en donde destinará apoyos a la conservación del suelo y agua (Programa Producción para el Bienestar).

En la sección de política social, como parte del derecho a la educación, propone una carrera sobre gestión integrada del agua en la Universidad del Bienestar. En el tema de autosuficiencia alimentaria y rescate del campo, el gobierno propone impulsar prácticas agroecológicas y sustentables, la conservación del suelo, el agua y la agrobiodiversidad, etcétera.

El Programa de Apoyo a Cafetaleros y Cañeros del país incluye el impulso a la conservación y el mejor uso del suelo y del agua, así como a la conservación de la biodiversidad. Con mucho optimismo proyecta a tres años la recuperación y el saneamiento de cuerpos de agua; el tratamiento

de aguas negras, y el manejo adecuado de los desechos. Una conciencia ambiental que todavía no ocurre.

Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024 (Promarnat)

Este programa tiene cinco objetivos prioritarios, dos de ellos dedicados al agua:

1. Promover la conservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y su biodiversidad con enfoque territorial y de derechos humanos, considerando las regiones bioculturales.
2. Fortalecer la acción climática a fin de transitar hacia una economía baja en carbono y una población, ecosistemas, sistemas productivos e infraestructura estratégica resilientes.
3. Promover al agua como pilar de bienestar, manejada por instituciones transparentes, confiables, eficientes y eficaces hacia un medio ambiente sano, con una sociedad participativa en su gestión.
4. Promover un entorno libre de contaminación del agua, el aire y el suelo que contribuya al ejercicio pleno del derecho a un medio ambiente sano.
5. Fortalecer la gobernanza ambiental a través de la participación ciudadana libre, efectiva, significativa y corresponsable en las decisiones de política pública.

El objetivo prioritario tres, cita el artículo 4° de la CPEUM, y relaciona el agua con el desarrollo integral y digno de los individuos, cuya

carencia transgrede el derecho a la salud, la alimentación, el ambiente sano y la vida y vivienda dignas. Por otro lado, el objetivo cuatro hace hincapié en la relación entre la carencia de agua y de saneamiento con el bienestar y la desigualdad de género y la salud. Refieren una encuesta de Naciones Unidas que señala que la falta de agua en la vivienda obliga a invertir largas horas en su recolección y transporte, tarea que es asumida principalmente por mujeres y niñas, lo cual impide destinar ese tiempo en tareas importantes para su desarrollo, a diferencia de hombres y niños. Una tarea impostergable señalada en este apartado es fortalecer a los prestadores de los servicios de agua potable y saneamiento, que en muchos casos carecen de las capacidades técnicas y gerenciales para brindarlos de manera adecuada. El porcentaje promedio por fugas todavía es del 40 % por errores en la medición, facturación y cobranza. Aunado a ello, menciona que los municipios tienen problemas financieros debido a que la recaudación por los servicios es ineficiente e insuficiente.

Asimismo resalta la necesidad de hacer más eficiente el uso del agua y señala como prioridad para la preservación de los recursos hídricos la protección y recuperación de las cuencas mediante una revisión de las políticas de asignación y concesión del agua, que permitirá garantizar la transparencia y erradicar la corrupción. El programa da prioridad a la reglamentación de las cuencas con el fin de asegurar la disponibilidad del agua en el futuro, así como la actualización de los decretos de veda, reserva y zonas reglamentadas en función de la disponibilidad. Es relevante la mención de la necesaria participación de la sociedad y la corresponsabilidad de los usuarios, las comunidades locales y la sociedad en general en el cuidado de los recursos hídricos del país; esto, a través de desarrollar y fortalecer los mecanismos de participación social efectiva

y democrática que permitan la participación colectiva en la toma de decisiones, en la implementación y para avanzar en la garantía del DHAS. Finalmente, añaden la necesidad de invertir en infraestructura necesaria para llevar el agua a lugares con poco o nulo acceso, promoviendo el uso de tecnologías innovadoras para su abasto, sobre todo en las comunidades más alejadas y marginadas, como según ya ocurre en 16 estados mediante la estrategia de captación de agua de lluvias y ecotecnias.

El objetivo prioritario cuatro señala que la contaminación del agua es un obstáculo para la seguridad hídrica y alimentaria, salud y conservación de la biodiversidad; relaciona que la contaminación de los cuerpos del agua amenaza el futuro del ser humano por sus potenciales efectos en la seguridad hídrica, alimentaria y la salud, así como en la permanencia de los ecosistemas y su biodiversidad. Esto afecta mayormente a la población en mayor marginación, que depende de manera directa de los cuerpos de agua contaminados como su principal suministro. Por otro lado, la contaminación del agua reduce la riqueza de especies y la provisión de los servicios ambientales, como el agua o productos derivados de la pesca. Indica la necesidad de enfocar los esfuerzos en las fuentes de contaminación, pero con enfoque de prevención, lo cual incluye esfuerzos para reducir el uso de agroquímicos; vigilar el cumplimiento de la normativa respecto a la disposición de los residuos sólidos; reforzar los mecanismos de la industria petroquímica, minera y otras para desincentivar la contaminación difusa, y fomentar el uso de productos agroecológicos. Asimismo, postula rehabilitar las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, vigilar el

cumplimiento de la normativa e incrementar el reuso de aguas residuales tratadas.

Programa Nacional Hídrico 2020-2024

Este programa presenta una política hídrica en correspondencia con los principios rectores del PND: por el bien de todos, primero los pobres; no dejar a nadie atrás, no dejar a nadie afuera; y honradez y honestidad.

El PNH 2020-2024 busca atender los siguientes cinco problemas públicos:

1. Acceso a los servicios de agua potable y saneamiento insuficiente e inequitativo.
2. Uso ineficiente del agua que afecta a la población y a los sectores productivos.
3. Pérdidas humanas y materiales por fenómenos hidrometeorológicos extremos.
4. Deterioro cuantitativo y cualitativo del agua en cuencas y acuíferos.
5. Condiciones institucionales y de participación social insuficientes para la adecuada toma de decisiones y el combate a la corrupción.

Establece cinco objetivos prioritarios, de los cuales tres están orientados a las personas o usuarios del agua, y dos al entorno habilitador. Cada uno de los objetivos incluye estrategias prioritarias que determinan la política en materia de agua, tal y como lo ilustra la Tabla 2.

Tabla 2. Objetivos y estrategias del PNH 2020-2024.

Visión al 2024: un México donde el agua es pilar de bienestar, manejo sostenible y coordinado del agua con participación ciudadana, de instituciones y de gobierno	
Objetivos	Estrategias resumidas
1. Garantizar progresivamente los derechos humanos del agua y saneamiento (DHAS), especialmente en la población más vulnerable	Proteger la disponibilidad y abatir el rezago de agua en cuencas y acuíferos para la implementación del DHAS Fortalecer a los organismos operadores del agua y saneamiento, a fin de asegurar servicios de calidad a la población Atender los requerimientos de infraestructura hidráulica
2. Aprovechar eficientemente el agua para contribuir al desarrollo sostenible en los sectores productivo	Aprovechar eficientemente el agua en el sector agrícola fortaleciendo las asociaciones de usuarios agrícolas a fin de mejorar su desempeño Apoyar y promover proyectos productivos en zonas marginadas, en particular pueblos indígenas y afromexicanos Orientar el desarrollo de los sectores industrial y de servicios para mitigar sus impactos en los recursos hídricos
3. Reducir la vulnerabilidad de la población ante inundaciones y sequías, con énfasis en pueblos indígenas y afromexicanos	Fortalecer los sistemas de observación e información hidrológica para mejorar la gestión integral de riesgos Fortalecer medidas de prevención de daños y atención de emergencias hidrometeorológicas y de adaptación al cambio climático Desarrollar infraestructura con soluciones basadas en la naturaleza
4. Preservar la integridad del ciclo del agua, a fin de garantizar los servicios hidrológicos que brindan cuencas y acuíferos	Conservar cuencas y acuíferos para mejorar la capacidad de provisión de servicios hidrológicos y evitar el deterioro de cuerpos de agua y sus impactos en la salud Reglamentar cantidad y calidad del uso del agua para reducir la sobreexplotación Atender las emergencias hidroecológicas para proteger la salud de la población y el ambiente
5. Mejorar las condiciones para la gobernabilidad del agua con el objetivo de fortalecer la toma de decisiones y combatir la corrupción	Garantizar el acceso a la información para fortalecer el proceso de planeación y rendición de cuentas Promover la participación ciudadana para garantizar la inclusión en la gestión del agua Fortalecer el sistema financiero del agua y las capacidades institucionales para la transformación del sector

Fuente: elaboración propia con referencia al PNH 2020-2024.

Cada estrategia implica acciones puntuales con participación mayoritaria de la Conagua en coordinación con otras instituciones como la Semarnat con sus órganos y organismos públicos descentralizados y desconcentrados. En particular, las estrategias del objetivo 5 están relacionadas con el objetivo de alfabetización hídrica en cuanto al acceso a la información.

El PNH desarrolló tres indicadores para cada uno de los cinco objetivos prioritarios. El primero corresponde a la meta para el bienestar, que consiste en una medida global que permite calificar el alcance de los objetivos hídricos prioritarios establecidos en el programa hacia finales de la actual administración. Al igual que la meta para el bienestar, los otros dos indicadores están constituidos por parámetros cuantitativos sin una meta específica identificable (p. ej., no especifican cuántos millones de habitantes deberán tener acceso al agua entubada en un momento en el tiempo en particular, parámetro 1 del objetivo prioritario 1), por lo que interpretamos que estos indicadores se aplicarán para hacer una valoración continua sobre la implementación de las estrategias prioritarias y, en su caso, de las acciones. La Tabla 3 muestra la relación de las metas para el bienestar y los parámetros para cada uno de los objetivos.

Tabla 3. Relación de indicadores sobre las metas para el bienestar y los parámetros por objetivo prioritario del PNH 2020-2024.

Objetivo prioritario PNH	Indicadores		
	Metas para el bienestar	Parámetro 1	Parámetro 2
1	Volumen de agua protegido /asignado o concesionado al uso doméstico o público urbano	Población con acceso diario al agua entubada, así como al saneamiento básico en las cuatro entidades más rezagadas	Proporción del agua residual municipal recolectada que es tratada
2	Grado de presión sobre el recurso hídrico en las zonas centro y norte del país	Rendimiento de cultivos básicos en zonas con infraestructura de riego	Eficiencia en el uso del agua medida, como el cociente de valor agregado bruto entre agua utilizada
3	Número de estaciones de observación meteorológica que están en operación	Habitantes protegidos contra inundaciones	Superficie productiva protegida contra inundaciones
4	Número de cuencas con caudal ecológico para la protección de la biodiversidad	Número de cuencas y acuíferos reglamentados	Proporción de sitios de monitoreo de calidad de agua superficial con calidad aceptable, buena o excelente
5	Recaudación de la Conagua en precios corrientes	Expedientes de los usuarios de aguas nacionales y bienes públicos inherentes atendidos vía los sistemas de trámites electrónicos de la Conagua	Número de CC con participación de mujeres y de grupos sociales que no estaban incorporados en la gestión del agua

Fuente: elaboración propia con referencia al PNH 2020-2024.

Normas oficiales

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que tienen relación con el agua han sido emitidas por diferentes dependencias y están ubicadas en diferentes sectores. Algunas relacionadas con las descargas de aguas residuales y la prevención y control de la contaminación fueron emitidas por la Conagua y Semarnat (Tabla 4).

Tabla 4. Normas oficiales y su campo de aplicación.

NOM	Campo de aplicación
<p>NOM-003-CONAGUA-1996. Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos</p>	<p>Aplicable a la construcción de pozos para la extracción de aguas nacionales destinadas a los usos agrícola, agroindustrial, doméstico, acuacultura, servicios, industrial, pecuario, público urbano y múltiples. La responsabilidad en la aplicación y el cumplimiento de la presente NOM corresponde al concesionario o asignatario que realice la construcción de pozos para la extracción de aguas nacionales</p>
<p>NOM-004-CONAGUA-1996. Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y la rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general</p>	<p>Aplicable a todos los pozos de exploración, monitoreo o producción que penetren total o parcialmente un acuífero, y que sean destinados a usos de extracción de agua clasificados en esta Norma, así como a aquellos que fueron perforados para otros usos, pero que están abandonados. Su cumplimiento es exigible a los concesionarios y asignatarios de pozos de extracción de agua y a los dueños de pozos para otros usos, y es independiente del trámite para la concesión o asignación del volumen de aguas nacionales</p>
<p>NOM-001-SEMARNAT-1996 actualización 2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales</p>	<p>Esta NOM no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes pluviales independientes. La modificación 2021 apunta la renovación de aspectos técnicos incumplidos</p>
<p>NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas y reutilizadas en servicios al público</p>	<p>Obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso. Cuando el servicio al público se realice por terceros, éstos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma desde la producción del agua tratada hasta su reúso o entrega, y conducción o transporte de la misma</p>
<p>NOM-001-CONAGUA-2011. Sistemas de agua potable, toma domiciliaria alcantarillado sanitario-hermeticidad-especificaciones y métodos de prueba</p>	<p>Obligatoria en el territorio nacional para: a) los fabricantes, importadores o comercializadores de los productos empleados en los sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario; y b) los responsables del diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario</p>

Fuente: elaboración propia con referencia a las normas citadas.

La iniciativa de reforma a la NOM-001-SEMARNAT-1996 inició en la administración previa (2012-2018), después de más de dos décadas de no tener una actualización. En 2021, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Comarnat) aprobó las reformas a la NOM-001 para establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Además de las NOM descritas, existen otras normas del sector salud (SSA) que están relacionadas con la calidad del agua para consumo humano. Las NOM son de carácter obligatorio en México, pero existen también las Normas Mexicanas (NMX) que están asociadas y complementan varias de las acciones presentadas en las NOM (como la Norma de caudal ecológico). Existen alrededor de 70 NMX vinculadas con el agua.

Leyes y planes estatales, Veracruz, México

Abordamos las legislaturas estatales y los ayuntamientos debido a su responsabilidad de establecer el marco legal para la regulación de los servicios públicos de su competencia y asegurar la participación ciudadana. Las leyes estatales sobre el agua precisan la reglamentación y los mecanismos de participación y organización social para la prestación de los servicios de agua y saneamiento a escala local.

Constitución política del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (CPEV)

Promulgada en 1825, pero no fue sino hasta su reforma de julio de 2017 cuando incluye la responsabilidad del Estado para garantizar a todas las personas el derecho de acceso a los servicios de agua potable en cantidad suficiente, y en condiciones de seguridad y calidad para satisfacer necesidades domésticas.

Ley de Aguas del Estado de Veracruz-Llave (Ley 21)

Esta Ley (promulgada en 2001) tiene por objetivo reglamentar el artículo 8 de la CPEV en materia de aguas de jurisdicción estatal, así como establecer las bases de coordinación entre los ayuntamientos y el Ejecutivo del estado. En 2019 se modificaron algunos de sus artículos, listados a continuación por su relevancia en este análisis (CPEV, 2019; Ley de Aguas del estado de Veracruz-Llave, 2019).

Los artículos 2 y 3 de esta Ley abordan las atribuciones que tendrán los ayuntamientos y el Ejecutivo del estado en sus respectivos ámbitos de competencia relacionados con la administración, suministro, distribución y calidad del agua, que permita lograr el desarrollo y aprovechamiento sustentable del recurso. El tema será abordado en este análisis de manera más detallada junto con las funciones y responsabilidades de las dependencias involucradas en la administración del agua.

El artículo 6, Capítulo II de la Ley, presenta el Sistema Veracruzano del Agua, integrado por el conjunto de políticas, instrumentos, planes,

programas, proyectos, obras, acciones, bases y normas que regulan la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas en el territorio del estado de Veracruz, así como la prestación de los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales.

En seguimiento, el artículo 7 establece que el Sistema Veracruzano del Agua será el instrumento rector de las políticas, lineamientos y normatividad técnica para la planeación, formulación, promoción, instauración, ejecución y evaluación de la programación hidráulica en el estado, a fin de que los ayuntamientos y el Ejecutivo del estado puedan lograr:

- El desarrollo sustentable del recurso en términos de la legislación aplicable.
- La elaboración, instauración, seguimiento, evaluación y actualización permanente de los programas de desarrollo hidráulico a nivel estatal y municipal.
- La administración y el manejo integral de las aguas de jurisdicción estatal.
- La prestación del servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales.
- La explotación, uso o aprovechamiento de las aguas asignadas al estado o a los municipios.
- El manejo y la conservación de la infraestructura hidráulica en el estado.

- La coordinación, participación y corresponsabilidad de acciones entre los gobiernos federal, estatal, municipal, sectores social y privado, usuarios y particulares.
- El establecimiento de un sistema financiero integral para el desarrollo hidráulico del estado.
- La ejecución de las acciones necesarias para incorporar en todos los niveles educativos la cultura del ahorro y el uso eficiente del agua como un recurso vital escaso, y el desarrollo de investigaciones técnicas, científicas y de mercado, que permitan lograr tal fin.

Por su parte, el artículo 9 establece que en el Sistema Veracruzano del Agua los usuarios y particulares podrán participar en la planeación, programación, construcción, administración, operación, supervisión o vigilancia de los servicios y sistemas hidráulicos, así como en el cuidado y uso eficiente del agua y la preservación de su calidad. Esta participación puede ser a través de la Comisión Estatal de Agua del Estado de Veracruz (CAEV), los ayuntamientos, las organizaciones del sector social relacionadas con el manejo del recurso (según lo dispuesto en el artículo 59), y las organizaciones privadas asociadas con el manejo del agua.

Cabe resaltar que los espacios de participación y representación social citados en la ley son escasos. La definición de sector social, aunque general, no es suficientemente incluyente, pues menciona ejidatarios, comunidades agrícolas, pequeños propietarios, artesanos, cooperativas y empresas sindicales, entre otros (artículo 4). No obstante, este enfoque pasa por alto la representación de grupos minoritarios, étnicos o culturales, al igual que organizaciones y grupos ambientales que

desempeñan un papel crucial en la sostenibilidad del medio ambiente y el manejo responsable del agua.

Además, destacamos la necesidad de ampliar la participación ciudadana directa que permita que los ciudadanos comunes tengan una voz más activa en las decisiones relacionadas con el agua. También proponemos la incorporación de expertos técnicos, académicos y profesionales en gestión del agua para garantizar una toma de decisiones informada y basada en la evidencia. Igualmente, resaltamos la importancia de incluir la participación de grupos juveniles y organizaciones que representen los intereses de las generaciones más jóvenes, fundamentales para el futuro sostenible.

La representación de la ciudadanía se limita a un usuario en el Consejo Administrativo de la CAEV (artículo 18), y a que uno o varios ciudadanos participen en el Sistema Veracruzano del Agua a través de:

“las organizaciones del sector social relacionadas directamente con el manejo del recurso y especificadas en el artículo 59” (artículo 9, sección III).

El artículo 59 establece que:

“Las organizaciones sin fines de lucro podrán realizar, previa concesión, las obras y acciones necesarias para el auto-abasto del agua potable, tratamiento, disposición y alejamiento de las aguas residuales (...)”.

Esto solo sujeta a las organizaciones a una relación contractual.

La participación de la academia y especialistas se circunscribe a aquellos que formen parte de la CAEV, ayuntamientos u organismos

operadores, organizaciones del sector social o del sector privado relacionadas directamente con el manejo del agua, de forma que no se reconocen como actores *per se*, lo que limita su capacidad de acción a pesar de que la misma Ley en el artículo 9 define que:

“Los grupos académicos, especialistas y asociaciones, podrán participar en la planeación del recurso y su programación hidráulica, a través de los organismos u organizaciones previstas en las fracciones anteriores”.

Es decir, con fines de ejecución de tareas técnicas y a través de contratos o administrativos de:

“obra pública; prestación de servicios; proyectos; suministro de tecnología; o II. Contratos administrativos de: conservación; mantenimiento; ampliación; o rehabilitación del sistema de agua potable, en su modalidad de inversión privada recuperable”.

Ley Estatal de Protección Ambiental (Ley Número 62)

Esta Ley, promulgada en 2000, es complementaria a la Ley Estatal de Aguas, y tiene por objeto la conservación, preservación y restauración del equilibrio ecológico, protección al ambiente y procuración del desarrollo sustentable. Aunque no ha tenido modificaciones en la administración actual, hacemos referencia a este instrumento pues describe la importancia de regular y aplicar disposiciones jurídicas en su caso para el aprovechamiento sustentable, la prevención y el control de la contaminación de las aguas de jurisdicción estatal, así como de las aguas

nacionales asignadas, en particular de las aguas que descargan en los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población, así como de las aguas nacionales que tengan asignadas (artículos 115 y 147) (Gobierno del estado de Veracruz-Llave, 2000; Gobierno del estado de Veracruz, 2019; Gobierno del estado de Veracruz, 2017).

Plan Veracruzano de Desarrollo PVD 2018-2024

En la escala estatal revisamos este PVD, el cual, a diferencia del PND federal, sí establece estrategias y líneas de acción a seguir sobre temas ambientales durante el actual periodo de gobierno. Inicia por definir que el estado de Veracruz atenderá nueve objetivos prioritarios de la Agenda 2030: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11 y 17. Sin embargo, el objetivo sustentable 6: Agua limpia y saneamiento, no está contemplado en este plan.

A grandes rasgos, el tema de agua es citado en relación con la cobertura de la demanda de la población, pero el documento no establece alguna estrategia específica para su cuidado. La estrategia general implica definir la política ambiental estatal que considere la protección del patrimonio natural, así como la mitigación y adaptación a los efectos de cambio climático.

Las líneas de acción que propone consisten en lo siguiente: establecer las normas preventivas para contrarrestar la contaminación del suelo, aire y agua; y gestionar alianzas estratégicas con el sector empresarial, agroindustrial y comercial con enfoque de desarrollo sostenible.

Un objetivo importante en los PVD precedentes era el de proteger las cuencas y microcuencas ubicadas en el estado. Tema que en la administración actual se aborda en el programa sectorial de medio ambiente y en los programas regionales hídricos.

Programa Sectorial de Medio Ambiente 2019-2024

En este programa el tema agua está más implícito que explícito en los objetivos, estrategias y líneas de acción. La parte más explícita está asociada con el objetivo del Fondo Ambiental Veracruzano (FAV) de promover esquemas de financiamiento que favorezcan la ejecución de proyectos para la conservación, restauración y manejo del agua de los bosques y las cuencas en el estado de Veracruz. Además, en los ordenamientos ecológicos territoriales, los programas están organizados por cuencas. El Fondo Ambiental Veracruzano desapareció por decreto estatal en abril de 2020; sus atribuciones y actividades fueron absorbidas por la Secretaría de Medio Ambiente (Sedema) (Sedema, 2019); sin embargo, desde ese momento y hasta la fecha no hay evidencia de que exista una continuidad de las mismas. Diversas organizaciones de la sociedad civil y centros de educación e investigación manifestaron su inconformidad con respecto a la desaparición del FAV, como Cemda, Sendas, Conecta Tierra, la Universidad Veracruzana y el Instituto de Ecología A.C. (INECOL), los cuales resaltaron la importancia que tiene el FAV en la conservación de los bosques de la cuenca del Pixquiac (misma que abastece del 40 % de agua a la ciudad Xalapa), entre otros proyectos de conservación en el estado (Cemda, 2020).

Nivel regional: programas hídricos regionales

El estado de Veracruz se encuentra dentro de dos regiones hídricas: Golfo Centro y Golfo Norte. Los instrumentos de planeación más recientes son los Programas Hídricos Regionales 2021-2024 de ambas regiones, que tienen como objetivo fortalecer la planeación y gestión hídrica, estableciendo como prioridad el DHAS, la seguridad hídrica de la población residente en sus cuencas, y el cuidado de los ecosistemas naturales asociados con el recurso agua. Estos programas pretenden integrar conocimiento y necesidades de sus habitantes en las estrategias resumidas en la Tabla 5, con muy limitadas acciones que abordan el acceso ciudadano a la información en materia de agua (Región Hidrológica Administrativa X Golfo Centro, 2022; Región Hidrológica Administrativa IX Golfo Norte, 2022).

Tabla 5. Estrategias y acciones prioritarias de los PHR Golfo Norte y Golfo Centro 2021-2024 con enfoque en integración de conocimiento y necesidades humanas.

Objetivo	Estrategia	Resumen de acciones comprometidas
1. Garantizar DHAS	<p>Agua disponible en cuencas y acuíferos</p> <p>Abatir rezago en acceso al agua potable y saneamiento</p> <p>Fortalecer organismos operadores de agua y saneamiento</p> <p>Atender requerimientos de infraestructura hidráulica</p>	<p>Recuperar volúmenes de agua; regularizar concesiones y asignaciones</p> <p>Fortalecer organizaciones comunitarias; promover tecnologías no convencionales; focalizar inversiones</p> <p>Verificar el cumplimiento de concesiones; proponer lineamientos para finanzas; fomentar la profesionalización de plantas de tratamiento y ciudadanización; promover la rehabilitación</p> <p>Identificar requerimientos, concesiones, proyectos en curso; impulsar coinversión y rehabilitación de plantas de tratamiento; promover la rehabilitación de plantas de tratamiento de aguas</p>
2. Aprovechar eficientemente el agua	<p>Aprovechar el agua de forma eficiente en el sector agrícola</p> <p>Fortalecer asociaciones de usuarios agrícolas</p> <p>Apoyar proyectos en zonas marginadas</p> <p>Orientar el desarrollo de los sectores industrial y de servicios</p>	<p>Conservar y modernizar infraestructura; fomentar el intercambio de agua; incentivar el uso de energías renovables; rehabilitar zonas de riego construidas o de drenaje subutilizadas o abandonadas</p> <p>Determinar y actualizar volúmenes de agua; promover coordinación y transparencia; fomentar la capacitación</p> <p>Otorgar concesiones de agua para pequeños productores agrícolas; fomentar el uso de tecnologías apropiadas, proyectos hidroagrícolas y de incentivos en zonas marginadas con visión de género; instaurar programas de sensibilización y capacitación en las comunidades indígenas y afroamericanas para el desarrollo de comités comunitarios para la gestión del agua</p> <p>Desarrollar programas de colaboración para el rescate de cuencas y acuíferos sobreexplotados; normas de uso y consumo de agua; buscar la relocalización de la industria de alta demanda de agua en zonas con disponibilidad; generar condiciones para el aprovechamiento de la infraestructura hidráulica en la generación de energía; apoyar proyectos de turismo que mejoren los servicios de agua y saneamiento de comunidades</p>

Objetivo	Estrategia	Resumen de acciones comprometidas
3. Reducir la vulnerabilidad ante inundaciones y sequías	<p>Fortalecer sistemas de observación e información hidrológica y meteorológica</p> <p>Fortalecer medidas de prevención de daños y adaptación al cambio climático</p> <p>Desarrollar infraestructura considerando soluciones basadas en la naturaleza</p> <p>Fortalecer atención de emergencias relacionadas con el agua</p>	<p>Impulsar la modernización de la infraestructura de medición y observación hidrológica, meteorológica y climatológica; fomentar el intercambio de información; focalizar inversiones en áreas de montañas</p> <p>Delimitar cauces y cuerpos de agua de propiedad nacional, mejorar sistemas de alerta temprana; elaborar y actualizar atlas y mapas de riesgos hidrometeorológicos; fortalecer programas contra la sequía; minimizar el impacto de inundaciones</p> <p>Desarrollar y adaptar proyectos para construcción, operación y mantenimiento de infraestructura en cauces; identificar zonas naturales para regular escurrimientos y mitigar impactos de inundaciones en centros de población</p> <p>Fortalecer la coordinación entre órdenes de gobierno y sectores; conservar y rehabilitar equipamiento especializado; reconstruir infraestructura hidráulica afectada; brindar servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento; capacitar a servidores públicos y representantes de la sociedad para atender a la población en caso de emergencias hidrometeorológicas</p>
4. Preservar la integridad del ciclo del agua	<p>Conservar cuencas y acuíferos</p>	<p>Implementar estrategias de conservación y prácticas agrícolas sustentables; esquemas de pago por servicios ambientales; acuerdos con comunidades indígenas y afro mexicanas; acciones para la recarga de acuíferos; procesos de consulta a comunidades</p>

Fuente: elaboración propia con referencia a los programas citados.

Discusión: (no) implementación de estrategias

Una problemática en el estado de Veracruz —reflejada en el país— es la limitada implementación de los planes y programas con estrategias enfocadas a un manejo eficiente del recurso hídrico debido a la falta de recursos e incluso de personal capacitado para llevarlas a cabo. Aunado a esto, los periodos de tiempo que abarcan las propuestas corresponden a

un sexenio, obstáculo temporal de las estrategias a largo plazo para lograr avanzar en los objetivos y metas planteadas, ya que los cambios de gobierno generalmente no dan continuidad a los programas.

Las dependencias nacionales y estatales encargadas del manejo y la administración del agua están alineadas al tema de austeridad financiera prevaleciente en la actual administración. Las dependencias estatales presentan la problemática de la desaparición de jefaturas o el recorte de personal, lo cual ocasiona que el personal a cargo tenga que atender más tareas de las que originalmente le fueron asignadas, y sea casi imposible atender lo establecido en los planes y programas (comunicación personal con funcionarios y exfuncionarios de CAEV y Conagua).

Coherencia vertical de instrumentos normativos

Existe un complejo entramado institucional y normativo relacionado con el agua. La LAN establece que el organismo encargado de la gestión de las aguas nacionales es la Conagua, con autonomía técnica, ejecutiva, administrativa, presupuestal y de gestión. La Conagua es la responsable de integrar y formular el PNH, así como de actualizar y vigilar su cumplimiento, además de proponer criterios y lineamientos que permitan dar unidad y congruencia a las acciones del gobierno de la república en materia de aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes.

En el ámbito nacional, la CPEUM, el PNH y el Promarnat garantizan el DHAS suficiente, salubre, aceptable y asequible, y establecen la participación de la federación y la ciudadanía para la consecución de este

fin común. Esos tres instrumentos guardan coherencia en cuanto a la prioridad hídrica, no así el Plan Nacional de Desarrollo.

Coherencia vertical y relaciones interinstitucionales en los niveles federal y estatal

En el ámbito regional, la Conagua tiene participación en dos organismos de cuenca (OC): Golfo Norte, que incluye 23 municipios de Veracruz, y el de la región hidrológico-administrativa Golfo Centro, que incluye 189 municipios de la entidad. Los OC tienen como misión administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, con participación de la sociedad para lograr el uso sustentable del recurso. De acuerdo con sus atribuciones legales, la Conagua, la CAEV y estos dos organismos deben elaborar un programa hídrico estatal para establecer las directrices de gestión, saneamiento y distribución del agua en Veracruz. Sin embargo, al momento de esta investigación, solo estuvieron disponibles los programas regionales 2021-2024.

En Veracruz, las instituciones encargadas específicamente de la gestión y distribución del agua son la Conagua, la CAEV y los organismos operadores del agua existentes en algunos municipios. Una de las atribuciones más prominentes de Conagua, en coordinación con la CAEV, es la asignación de permisos de extracción de agua formalmente denominados como concesiones, así como los permisos de descarga y extracción de materiales (sedimentos).

Sobre el tema del acceso al agua potable, la Ley 21 de Aguas del Estado de Veracruz mantiene la coherencia vertical sobre el DHAS, en alineación con los instrumentos nacionales arriba citados.

Para todos los demás temas relacionados con el agua y cambio climático, entre otros, existen mesas institucionales del sector ambiental donde participan las ahora representaciones estatales (anteriormente delegaciones estatales) de la Comisión Nacional Forestal (Conafor), Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), Conagua, Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (Profepa), y estatales como la Sedema, la Procuraduría Estatal de Medio Ambiente (PEMA), y la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural y Pesca (Sedarpa) y la Secretaría de Educación de Veracruz (SEV).

Transparencia y acceso a la información

La Conagua, en conjunto con la Semarnat, son las instituciones encargadas de generar el PNH, y del cual deben derivar los planes hídricos regionales (PHR). Señalamos aquí el retraso administrativo en la generación de los PHR de las regiones Golfo Centro y Golfo Norte, que tardaron casi 10 años en actualizarse y publicarse, desde 2013 hasta 2022, y accesibles en línea hasta 2023. De la misma manera, tampoco identificamos ningún acceso a la planeación ni instrumentos de operación de la CAEV. Relacionamos estos casos de información no accesible como una limitante a la participación ciudadana convocada en el objetivo prioritario 5 del PNH 2020-2024 que se centra en el acceso a la información y la apertura a la participación de la ciudadanía en la toma de decisiones para "mejorar las condiciones para la gobernabilidad del

agua” (Semarnat, 2020). Nos resultó complicado monitorear el trabajo conjunto entre las dependencias debido al difícil acceso a los planes inherentes a la política pública estatal sobre agua.

Por otro lado, y relacionado con las citadas NOM asociadas con el agua, señalamos la pendiente actualización de las Declaratorias de Clasificación de Cuerpos de Aguas Nacionales, como instrumento técnico y legal para la regulación de la contaminación por descargas de aguas residuales, en seguimiento a los permisos de descarga que otorga la Conagua. Estas declaratorias establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, por lo que son un medio para gestionar el recurso hídrico. Las declaratorias actuales datan del año 2011, y su actualización sería de gran utilidad para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021 modificadas (Tabla 1); además de que contribuirían a la congruencia con los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89.

La transparencia y el acceso a la información desempeñan un papel fundamental en la promoción de la alfabetización hídrica. Cuando las comunidades tienen acceso a información clara y transparente sobre los recursos hídricos, su gestión y los desafíos relacionados se crea un entorno propicio para desarrollar habilidades de alfabetización hídrica.

Alfabetización hídrica

Para un mejor entendimiento y aplicación efectivos de la normatividad, planes y programas, es necesario combinar algunos conceptos técnicos en el conocimiento coloquial. Además, se requiere que la población se familiarice con el significado de los términos usados para la gestión del

agua para identificar —en su caso— distorsiones de las normativas cuando se traducen en instrumentos para ponerlos en operación. Por ejemplo, el PNH 2020-2024 busca atender, entre otros problemas públicos, las “condiciones institucionales y de participación social insuficientes para la adecuada toma de decisiones y combate a la corrupción” (Semarnat, 2020) e identifica como un lineamiento rector para el sector hídrico a la “sociedad informada y participativa para desarrollar una cultura del agua” (Semarnat, 2020). Sin embargo, en su objetivo cinco plantea, a fin de fortalecer la toma de decisiones y combatir la corrupción, mejorar las condiciones para la gobernabilidad del agua, no para su gobernanza. Enfatizamos esta diferencia, porque aunque los vocablos son parecidos, es la buena gobernanza el concepto que plantea la participación social en la toma de decisiones e incluye la transparencia y rendición de cuentas (lo que conduce al combate a la corrupción); en cambio, la gobernabilidad se refiere a la capacidad de un sistema político para ejercer autoridad, control y administración efectiva sobre los asuntos públicos.

Reflexiones finales (conclusiones)

El estado de Veracruz presenta un enorme potencial hídrico, pero también enfrenta problemas de disponibilidad de agua. Con frecuencia ocurren eventos contradictorios, como la problemática del abastecimiento de agua contra contingencias ambientales ocasionadas por inundaciones, sobre todo en el norte del estado. Tales contrastes incrementan la vulnerabilidad de la población ante eventos hidrometeorológicos extremos y problemas de salud asociados con el agua, tendencia que podría revertirse con la adecuada implementación de una estrategia integral y

participativa de gestión del recurso. Tan importante es disponer de los medios para extender la infraestructura de agua como lo es informar de forma oportuna y generar diálogos de saberes con las percepciones de la ciudadanía en materia del agua para generar programas participativos, integrales e incluyentes.

Identificamos la existencia de una **coherencia vertical** incompleta en la política hídrica del nivel nacional al estatal-Veracruz. La alineación normativa (planes y programas) está mejor lograda entre el Plan Nacional Hídrico y los Programas Hídricos Regionales por regiones hidrológico-administrativas de la Conagua, aunque identificamos algunos vacíos discursivos a diferentes escalas. Por ejemplo, no hay un Programa Estatal Hídrico, y tampoco identificamos programas o acciones específicas de la CAEV alineadas a alguna directriz estatal, por lo que no podemos asegurar que exista una coherencia vertical hasta el nivel estatal. Además, la alineación legislativa tiene todavía espacios que cubrir, porque no todos los planes y programas descritos abordan la importancia de la participación ciudadana y la democratización del agua.

Identificamos una incoherencia en la Ley 21 de Aguas de Veracruz, en donde los espacios institucionales y legalmente reconocidos restringen el tipo e impacto de la participación ciudadana, pues no van más allá de relaciones contractuales, y espacios limitados en organismos de planeación y de toma de decisiones, por lo que quedan limitados en la construcción de un diálogo y en la búsqueda de acciones colectivas. La sociedad civil organizada juega el papel de puente entre estos actores, así como para apoyar lo que llamamos “coherencia vertical de políticas públicas”, que implica no solo el eco normativo y legislativo de un

programa o ley a otra, sino la existencia de leyes de transparencia y compromiso político para visibilizar la información que debería ser pública.

La **transparencia y el acceso a la información** son cuestionables. En este artículo expresamos nuestra preocupación por la limitada información de algunas páginas web de dependencias del agua, así como planes y programas hídricos en el estado de Veracruz. Aun en nuestra calidad de investigadoras, la información no fue siempre accesible, lo que implica un acceso todavía más complejo para quienes no cuentan con recursos de búsqueda. Esto nos lleva a señalar la importancia de que los funcionarios a cargo de la gestión del agua y los ciudadanos establezcan una relación de colaboración preferentemente basada en la transparencia de acciones y el acceso a la información. Tanto proveedores como usuarios enfrentan desde distintos aspectos la problemática sobre el recurso. Esta colaboración implicaría poner a disposición del usuario la información relevante para atender las contingencias hídricas y, al mismo tiempo, establecer un diálogo permanente en donde el usuario externé cuáles son sus necesidades; ello, hacia una potencial vinculación de la ciudadanía en algunas acciones concretas de las instituciones.

El **alfabetismo hídrico**. Ambas reflexiones —tanto de coherencia vertical de políticas públicas como de transparencia y acceso a la información— se conjugan en nuestra tercera reflexión en pro de un necesario alfabetismo hídrico. En el planteamiento de este trabajo propusimos incluir el alfabetismo legislativo y normativo referido a la relevancia de que la ciudadanía tenga el acceso y esté informada de manera oportuna sobre los planes y programas de la política hídrica tanto en el nivel nacional, como (preferentemente) estatal y local. En algún momento de la ecuación entre leyes, normas, planes y programas

analizados en este artículo sigue ausente el aterrizaje de todos estos conocimientos y propósitos de política pública hacia el ciudadano usuario del agua. Y todavía más ausente es el flujo en el sentido inverso, la opinión, saberes y creencias ciudadanas sobre el agua son un capital desconocido y con limitada interacción en los planes y programas citados. Por ende, el reto tiene una doble dimensión, pues tanto la ciudadanía como los funcionarios con competencia en la gestión del agua debieran atender temas de alfabetización hídrica de manera explícita y con mayor regularidad. Las autoras continuaremos la investigación sobre estos temas a través de proyectos en curso, como por ejemplo, los próximos resultados de la encuesta de percepciones ciudadanas sobre el agua en la zona metropolitana de Xalapa 2022-2023.

Agradecimientos

Las autoras agradecemos a los funcionarios públicos, en acordado anonimato, que gentilmente aceptaron ser entrevistados y se mostraron abiertos a una comunicación continua sobre los temas de este artículo.

Agradecemos también el apoyo de los proyectos:

- “Ecohidrología para la sustentabilidad y gobernanza del agua y cuencas para el bien común” (PRONAI Clave 318956). Sección Papaloapan.
- “Inserción institucional del monitoreo participativo del agua y la biodiversidad acuática en Conagua para mejorar la gestión del agua y los ecosistemas acuáticos en México” (A0406). Fundación Gonzalo Río Arronte IAP.

- “Cuencas y Ciudades”, Fundación Gonzalo Río Arronte IAP y Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C.
- “Miradas comunitarias sobre el agua: datos comunitarios para la gestión de conocimiento de los recursos hídricos y ecosistemas acuáticos.” 2022 RISC-RISE Community Engagement Partnership.
- “El agua y la ciudadanía.” 2021 RISC-RISE Community Engagement Partnership.

Referencias

Agua para Todxs, Agua para la Vida. (2014). *Convención del agua y la energía, México*. Recuperado de <https://aguaparatodos.org.mx/quienes-somos/>

Besteiro, A. G. (2020). *Los estudios sociales del agua y la acción ambiental, ¿innovación o impostura?* XI Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Zaragoza, España.

Burns, H., & Moctezuma, P. (2013). *Manual Agua para todos, agua para la vida*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana y Centro para Sustentabilidad Incalli Ixcahuicopa. Recuperado de <https://aguaparatodos.org.mx/web/html/archivos/interiores%20m anual.pdf>

Cámara de Diputados. (14 de abril, 2020). Iniciativa Ciudadana de Ley General de Aguas. *Gaceta Parlamentaria*. Recuperado de <https://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/64/2020/abr/20200414-IV.html#Iniciativa1>

CPEUM, Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (28 de mayo, 2021). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado de <https://www.gob.mx/indesol/documentos/constitucion-politica-de-los-estados-unidos-mexicanos-97187>

CPEV, Constitución Política del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. (3 de octubre, 2019). *Constitución Política del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave*. Recuperado de <https://www.legisver.gob.mx/leyes/LeyesPDF/CONSTITUCION031019.pdf>

Cemda, Centro Mexicano de Derecho Ambiental. (2020). *Organizaciones de la sociedad civil exigen la permanencia del fondo ambiental veracruzano*. Recuperado de <https://cemda.org.mx/wp-content/uploads/2020/05/osc-fondo-ambiental-ver-1.pdf>

DOF, Diario Oficial de la Federación. (1º de diciembre, 1992). *Ley de Aguas Nacionales*. Recuperado de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lan/LAN_orig_01dic92_ima.pdf

Fuentes-Martínez, J. (2014). Acceso a la información en materia de agua. *Derecho a saber: balance y perspectivas cívicas*. Recuperado de <https://fundar.org.mx/publicaciones/derecho-saber-balance-y-perspectivas-civicas/>

Gobierno del estado de Veracruz-Llave. (30 de junio, 2000). Ley Estatal de Protección Ambiental. *Gaceta Oficial. Órgano del Gobierno del Estado de Veracruz-Llave*, Recuperado de <https://www.legisver.gob.mx/leyes/LeyesPDF/LEYESTATALDEPROTECCIONAMBIENTAL07082024.pdf>

Gobierno del estado de Veracruz. (2019). *Plan Veracruzano de Desarrollo. (2019-2024)*. Recuperado de <https://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2019/06/Plan-Veracruzano-Desarrollo-2019-2024.pdf>

Gobierno del estado de Veracruz. (2017). *Programa Estatal de Medio Ambiente 2017-2018*. Recuperado de <https://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/8/2011/12/Programa-Estatal-de-Medio-Ambiente-2017-2018.pdf>

Hernández-Huerta, A., Pérez-Maqueo, O., & Equihua, M. (2018). ¿Puede el desarrollo ser sostenible, integrado y coherente? *Regions and Cohesion*, 8(3), 1-14. DOI: 10.3167/Reco.2018.080302

Koff, H., Challenger, A., & Portillo, I. (2020). Guidelines for operationalizing policy coherence for development (PCD) as a methodology for the design and implementation of sustainable development strategies. *Sustainability*, 12, 4055. DOI: 10.3390/Su12104055

Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública. (20 de mayo, 2021). *Diario Oficial De La Federación*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx/index.php?year=2021&month=05&day=20&edicion=MAT#gsc.tab=0>

Ley de Aguas del estado de Veracruz-Llave. (4 de febrero, 2019). Ley 21. *Gaceta Oficial Órgano del Estado De Veracruz–Llave*. Recuperado de <https://www.legisver.gob.mx/leyes/LeyesPDF/LAGUAS04022020.pdf>

McCarroll, M., y Hamann, H. (2020). What we know about water: A water literacy review. *Water*, 12(10), 2803.

Olvera-Molina, M., Seguin-Tovar, N., & Sepúlveda-Toledo, M. (2019). *Rendición de cuentas y transparencia en agua y saneamiento como política de Estado*. Ciudad de México, México: RedAtl.

Otaki, Y., Sakura, O., & Otaki, M. (2015). Advocating water literacy. *Engineering Access*, 1(1), 36-40.

Rare.org. (2023). *Rare.org*. Recuperado de <https://rare.org/>

Región Hidrológica Administrativa X Golfo Centro. (2022). *Programa Hídrico Regional 2021-2024*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.

Región Hidrológica Administrativa IX Golfo Norte. (2022). *Programa Hídrico Regional 2021-2024*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.

Sedema, Secretaría de Medio Ambiente. (2019). Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PROMARNAT) 2020-2024. *Gaceta Oficial*, Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596232&fecha=07/07/2020#gsc.tab=0

Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Diario Oficial de la Federación Cemda. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Sepúlveda, M. (2021). *El acceso a la información de agua y saneamiento: obligaciones de transparencia y otros mandatos legales*. Recuperado de https://ciesas.edu.mx/wp-content/uploads/2021/11/DiagnosticoConstruccionCC%81nSistema-Integral_Sepulveda-Mayli.pdf

Vidriales, G. (2016). *Análisis de la gestión del agua de la ciudad de Xalapa: aportaciones para la construcción de nuevos modelos de gestión del recurso hídrico*. Recuperado de http://colver.com.mx/RepositorioTesis/MDRS/20102012_VidrialesChan_Georgina_29-11-2016.pdf

Wilder, M. O., Austria, P. F. M., Romero, P. H., & Ayala, M. B. C. (2020). The human right to water in Mexico: Challenges and opportunities. *Water Alternatives*, 13(1), 28-48.