



ISSN 2007-2422

# Tecnología y Ciencias de Agua



Nevaldo Taysapampa, Cordillera Blanca, Los Andes, Perú. Foto: Arnaldo Aldo Tacsí Palacios.

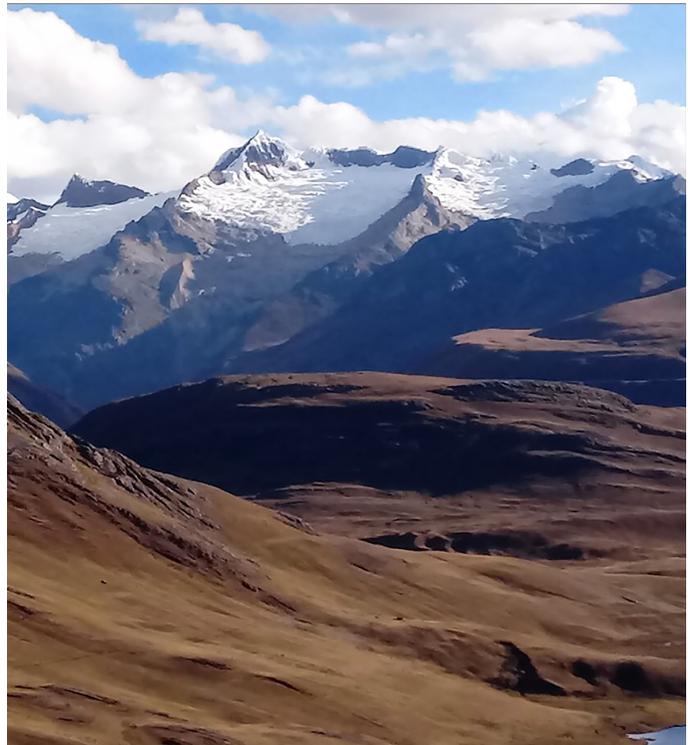


# Tecnología y Ciencias del Agua

Vol. 16, núm. 6, noviembre-diciembre de 2025

**Portada:** Nevado Tayapampa, Cordillera Blanca, Los Andes, Perú. La cuenca con presencia glaciaria en los Andes tropicales presenta continuo derretimiento, como efecto del cambio climático, lo que influye en la generación de escorrentía y en los procesos hidrológicos. En Perú, los glaciares tropicales están produciendo un aporte hídrico importante a la cuenca, especialmente en época seca, pues muchas comunidades utilizan los aportes de los glaciares de la Cordillera Blanca. Sin embargo, en 58 años, esta cordillera presenta una reducción en 44 % de volumen glaciario y el glaciar de Yanamarey alcanza el 90 % de volumen. Ver el artículo "La contribución hídrica del glaciar y la dinámica de los procesos glaciológicos-hidrológicos de la cuenca. Caso Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú / The water contribution of the glacier and the dynamics of glaciological-hydrological processes in the basin. Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú case" de Arnaldo Tacsi-Palacios, Abel Mejía, Thomas Condom y María Cardenas-Gaudry.

**Foto:** Arnaldo Aldo Tacsi Palacios.





# 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 Torregrosa 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*

**Secretario Técnico**  
**Mtro. Eduardo López Ramírez**  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

**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 Marcano**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Venezuela • **Dra. Aziza Akhmouch**, 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 Vítório 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 Verdusco**, 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)*

La contribución hídrica del glaciar y la dinámica de los procesos glaciológicos-hidrológicos de la cuenca. Caso Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú

*Arnaldo Tacsí-Palacios*

*Abel Mejía*

*Thomas Condom*

*María Cardenas-Gaudry*

Estimación de volumen de una presa usando percepción remota y Machine Learning

*Fernando Flores-Escobar*

*Enrique Palacios-Vélez*

*Adolfo Antenor Exebio-García*

*Demetrio Salvador Fernández-Reynoso*

*Ramón Valdivia-Alcalá*

Municipal model evaluation for providing drinking water and sanitation services in a developing country

*Kerlyn Lugo*

*Yorman Peraza*

*Adriana Márquez*

*Edilberto Guevara*

*Sergio Pérez*

*Eduardo Buroz*

Potencial de riesgo a la salud por consumo de agua contaminada con cromo en Zimapán, Hidalgo, México

*Marco Antonio Sánchez-Olivares*

*Juan Carlos Gaytán-Oyarzun*

*Maritza López-Herrera*

*Alejandra Sarahí Hernández-Lozada*

Monitoreo de cianobacterias como estrategia para el aseguramiento de la calidad del agua potable distribuida en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador

*Luis Ortez*

*Yaneth Alvarado*

*Gabriela Montes*

*Alma Aguilar*

Metodologías y estudios en torres de enfriamiento húmedas a contraflujo con enfoque en la reducción de las pérdidas de agua por evaporación y arrastre

*Carlos René Ramírez-Ferreira*

*Carlos Rubio-Maya*



## Contents

### Artículos (traducción)

#### *Articles (translation)*

*The water contribution of the glacier and the dynamics of glaciological-hydrological processes in the basin. Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú case* 01

*Arnaldo Tacsí-Palacios*

*Abel Mejía*

*Thomas Condom*

*María Cardenas-Gaudry*

*Estimation of dam volume using remote sensing and Machine Learning* 43

*Fernando Flores-Escobar*

*Enrique Palacios-Vélez*

*Adolfo Antenor Exebio-García*

*Demetrio Salvador Fernández-Reynoso*

*Ramón Valdivia-Alcalá*

*Evaluación de modelo municipal para la provisión de servicios de agua potable y saneamiento en un país en desarrollo* 80

*Kerlyn Lugo*

*Yorman Peraza*

*Adriana Márquez*

*Edilberto Guevara*

*Sergio Pérez*

*Eduardo Buroz*

*Potential health risk from drinking water contaminated with chromium in Zimapán, Hidalgo, Mexico* 147

*Marco Antonio Sánchez-Olivares*

*Juan Carlos Gaytán-Oyarzun*

*Maritza López-Herrera*

*Alejandra Sarahí Hernández-Lozada*

*Monitoring of cyanobacteria as a strategy to ensure the quality of drinking water distributed in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador* 172

*Luis Ortez*

*Yaneth Alvarado*

*Gabriela Montes*

*Alma Aguilar*

*Methodologies and studies on counterflow wet cooling towers: strategies for reducing water losses through evaporation and drift* 199

*Carlos René Ramírez-Ferreira*

*Carlos Rubio-Maya*



## Contenido

### Artículos (originales)

#### *Articles (original)*

Rendimiento y productividad del agua en cultivos de invierno bajo riego deficitario

*Sergio Arturo Ortiz-Díaz*

*Pablo Preciado-Rangel*

*Manuel Fortis-Hernández*

*Ricardo Israel Ramírez-Gottfried*

*Sellenne Yuridia Márquez-Guerrero*

*Jessica Janeth Rocha-Santillano*

*Arturo Reyes-González*

Evaluación de escenarios en la validación de datos de precipitación del satélite GPM con estaciones meteorológicas para uso en emergencias ambientales

*Carlos Dueñas-Valcárcel*

*Julio Rojas-Flores*

*Óscar De-la-Cruz-Huerta*

*Carlos Gómez-Karpenko*

Sensibilidad de índices de sequía dependiendo de la longitud de registros climatológicos

*Aleida Vilchis-Francés*

*Carlos Díaz-Delgado*

Implementación de un sistema de bombeo utilizando una turbina hidráulica sin consumo de energía eléctrica

*Camilo Andrés Tovar-Trujillo*

*Juan Gonzalo Ardila-Marín*

*Jean Carlos Acosta-Vargas*



## Contents

### Artículos (traducción)

#### *Articles (translation)*

*Yield and water productivity in winter crops under deficit irrigation* 285

*Sergio Arturo Ortiz-Díaz*

*Pablo Preciado-Rangel*

*Manuel Fortis-Hernández*

*Ricardo Israel Ramírez-Gottfried*

*Sellenne Yuridia Márquez-Guerrero*

*Jessica Janeth Rocha-Santillano*

*Arturo Reyes-González*

*Evaluation of scenarios in the validation of precipitation data from the GPM satellite for use in environmental emergencies by meteorological stations* 317

*Carlos Dueñas-Valcárcel*

*Julio Rojas-Flores*

*Óscar De-la-Cruz-Huerta*

*Carlos Gómez-Karpenko*

*Sensitivity of drought indices depending on the length of climatological records* 346

*Aleida Vilchis-Francés*

*Carlos Díaz-Delgado*

*Implementation of a pumping system using a hydraulic turbine without electric power consumption* 391

*Camilo Andrés Tovar-Trujillo*

*Juan Gonzalo Ardila-Marín*

*Jean Carlos Acosta-Vargas*

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-01

Artículos

**La contribución hídrica del glaciar y la dinámica de los procesos glaciológicos-hidrológicos de la cuenca. Caso Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú**

**The water contribution of the glacier and the dynamics of glaciological-hydrological processes in the basin. Yanamarey, Cordillera Blanca, Perú case**

Arnaldo Tacsi-Palacios<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4125-6155>

Abel Mejía<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9070-3898>

Thomas Condom<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-8580>

María Cardenas-Gaudry<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1053-8456>

<sup>1</sup>Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas, Autoridad Nacional del Agua / Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Lima, Perú, [atacsi@ana.gob.pe](mailto:atacsi@ana.gob.pe)

<sup>2</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Lima, Perú, [jabel@lamolina.edu.pe](mailto:jabel@lamolina.edu.pe)

<sup>3</sup>Université Grenoble Alpes-IRD-CNRS-INRAe-Grenoble INP, Institut des Geosciences de l'Environnement (IGE), UMR 5001, Grenoble, Francia, [Thomas.condom@ird.fr](mailto:Thomas.condom@ird.fr)



<sup>4</sup>Universidad Científica del Sur, Lima, Perú,  
mcardenasga@cientifica.edu.pe

Autor para correspondencia: Arnaldo Tacsi-Palacios, atacsi@ana.gob.pe

## Resumen

La cuenca con presencia glaciar en los Andes tropicales presenta continuo derretimiento, como efecto del cambio climático, lo que influencia en la generación de escorrentía y en los procesos hidrológicos. El estudio se realizó entre los años 2013 y 2020 en la microcuenca Yanamarey (Cordillera Blanca, Perú), utilizando las imágenes de satélite y modelización hidro-glaciológica, aplicando los modelos semidistribuidos GSM y SOCONT, para estimar procesos glaciológicos e hidrológicos distribuidos por bandas de altitud. En este periodo, en el glaciar se determinaron en promedio 0.27 km<sup>2</sup> de superficie y 1.65 hm<sup>3</sup> de volumen; la contribución hídrica promedio en la microcuenca es de 93 l/s, distribuidos de la siguiente forma: 8 % de hielo, un 15 % de nieve, un 27 % de agua subterránea y un 50 % de precipitación (directa). Además, los caudales de hielo y nieve presentan una tendencia negativa anual de 0.5 y 0.7 l/año, respectivamente. Produciendo al final de siete años en: a) proceso glaciológico, la fusión de hielo de 14 m debajo de la altitud de 4 800 msnm, la acumulación de nieve de 12.7 m encima de la altitud de 5 000 msnm; b) proceso hidrológico (zona no glaciar), en suelo limpio, el agua acumulada se infiltra de 118 m (0.19 cm/h) y agua superficial acumulada de 34 m (0.06 cm/h). Los valores estimados de la contribución hídrica y la variación de disponibilidad anual de la masa glaciar por altitudes dan una idea de los procesos hídricos que ocurren en cabecera

de cuenca y de la importancia de sus efectos para la vida útil de los glaciares.

**Palabras clave:** Cordillera Blanca, glaciar Yanamarey, modelización hidro-glaciológica, GSM, SOCONT, procesos hídricos.

## Abstract

The watershed with glacier presence in the Tropical Andes presents continuous melting, as an effect of climate change, which influencing runoff generation and hydrological processes. The study was conducted between 2013 and 2020 in the Yanamarey micro-watershed (Cordillera Blanca, Peru), using satellite images and hydro-glaciological modeling, applying the semi-distributed models GSM and SOCONT, to estimate glaciological and hydrological processes distributed by altitude bands. During this period, an average of 0.27 km<sup>2</sup> of surface area and 1.65 hm<sup>3</sup> of volume were determined in the glacier; the average water contribution in the micro-basin is 93 l/s, distributed as follows: 8 % ice, 15 % snow, 27 % groundwater and 50 % precipitation (direct). In addition, the ice and snow flows show a negative annual trend of 0.5 and 0.7 l/year, respectively. Producing at the end of seven years in: a) glaciological process, ice melt of 14 m below the altitude of 4 800 masl, snow accumulation of 12.7 m above the altitude of 5 000 masl; b) hydrological process (non-glacial zone), in clean soil, accumulated water infiltrates of 118 m (0.19 cm/h) and accumulated surface water 34 m (0.06 cm/h). The estimated values of the water contribution and the variation of annual availability of the glacier mass by altitude give us an idea of the water processes that occur at the headwaters of the basin and the importance of their effects on the lifespan of the glaciers.

**Keywords:** Cordillera Blanca, Yanamarey glacier, hydro-glaciological modeling, GSM, SOCONT, water processes.

Recibido: 25/01/2024

Aceptado: 05/09/2024

Publicado *ahead of print*: 19/09/2024

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

En Perú, los glaciares tropicales están produciendo un aporte hídrico importante a la cuenca, especialmente en época seca (Baraer *et al.*, 2012), pues muchas comunidades utilizan los aportes de los glaciares de la Cordillera Blanca. Sin embargo, en 58 años, esta cordillera presenta una reducción en 44 % de volumen glaciar y el glaciar de Yanamarey alcanza el 90 % de volumen (AEGL & ANA, 2020). Estos cambios de cobertura de glaciares en la cuenca influyen en la hidrología (Ramírez 2008; López-Moreno *et al.*, 2017) debido a que están reduciendo el aporte del glaciar a los caudales del río (Baraer *et al.*, 2012).

El proceso de formación de los glaciares por la presencia de nieve está sujeto sobre todo a la precipitación y temperatura, por lo que juegan un rol importante en el cambio dinámico en las dimensiones físicas de los glaciares. Así, la reducción del glaciar a través del derretimiento de hielo y nieve podría tener implicancias en la hidrología (Ramírez, 2008) que se utiliza actualmente en 11 regiones para uso doméstico, agropecuario, energético y minero (AEGL & ANA, 2021b). Las limitantes en zonas de montaña son la disponibilidad y calidad de datos meteorológicos,

hidrológicos y glaciológicos, lo que obstaculiza el desarrollo de un sistema de pronósticos continuo de caudales diarios (Bennett, Robertson, Ward, Hapuarachchi, & Wang, 2016). Sin embargo, se ha evaluado el mínimo de años para establecer modelos eficientes de precipitación-escorrentía (con glaciares), que sugiere que un periodo de calibración de cinco años a una escala temporal diaria captura la mayor parte de la variabilidad hidrológica, por lo que este sería el mínimo de años para lograr un rendimiento razonable del modelo predictivo (Bennett *et al.*, 2016; Merz, Parajka, & Blo, 2009). Por lo tanto, para la presente investigación se recopilaron, evaluaron y validaron registros para el periodo 2013-2020 (siete años), y que fueron ingresados como variables en la modelización hidro-glaciológica.

El modelo hidro-glaciológico que evalúa la cuenca (áreas glaciares y no glaciares) ha utilizado con éxito el modelo grado-día (Condom *et al.*, 2012; Muñoz, Huggel, Drenkhan, Vis, & Viviroli, 2021) para simular la contribución del agua de la fusión glaciaria en altas montañas, con una reducción constante de tamaño inducida por el clima (Khadka, Kayastha, & Kayastha, 2020) para proyectar el cambio de masa glaciaria. Por esto, los glaciares tropicales, como la Cordillera Blanca, requieren de un estudio detallado orientado a la hidro-glaciología para conocer el comportamiento de la escorrentía y la influencia de los aportes de agua por fusión de hielo y fusión de nieve.

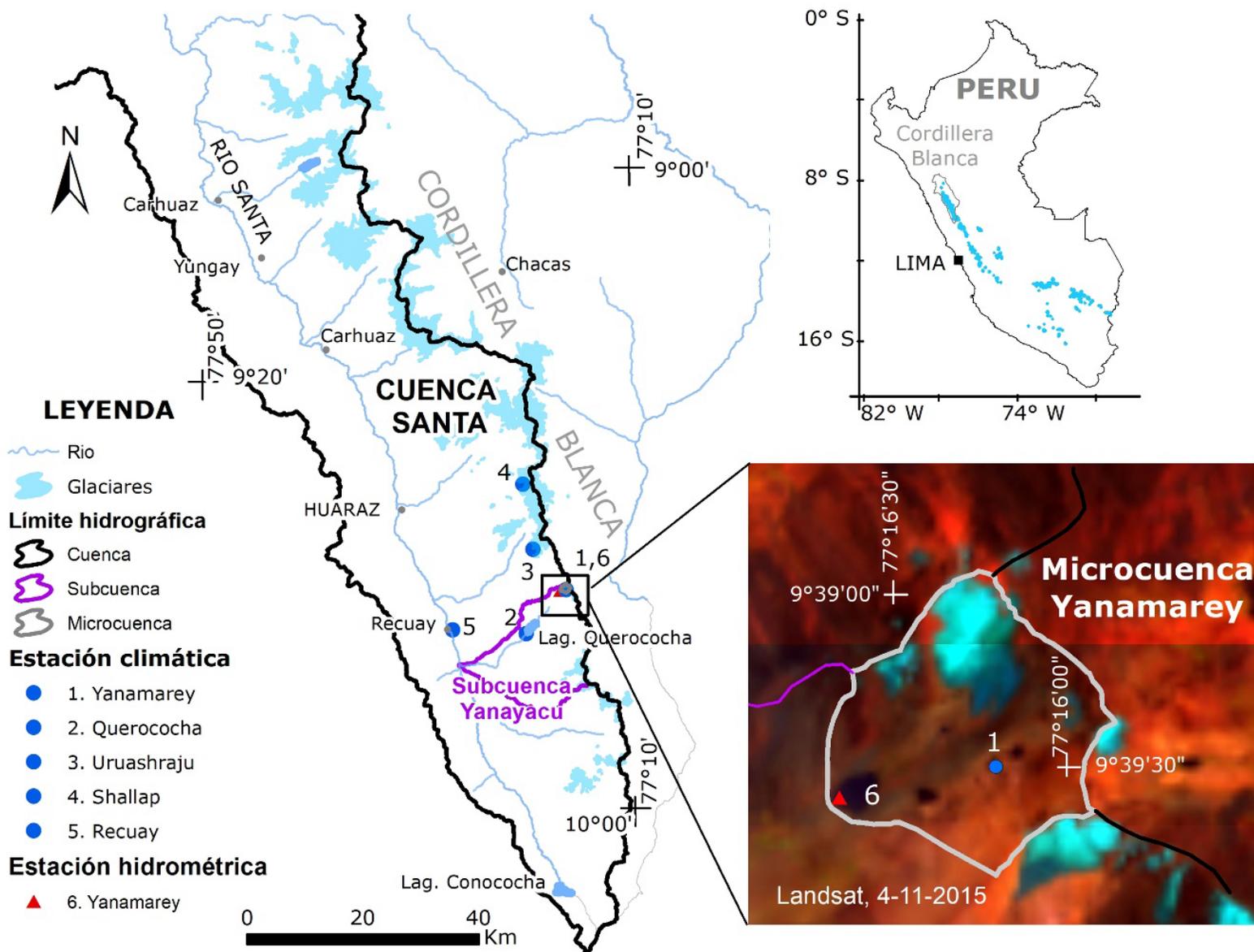
En este contexto, el objetivo del artículo es evaluar el comportamiento de los caudales, parámetros físicos y procesos hídricos en la cuenca (zona glaciaria y no glaciaria) de la microcuenca Yanamarey ubicada en la Cordillera Blanca, para los años 2013 a 2020, mediante el modelo hidro-glaciológico, utilizando la temperatura y la precipitación como principales variables. Por lo tanto, las estimaciones de la

disponibilidad de la escorrentía producidas en la microcuenca servirán para informar a la población rural y urbana, a fin de que tomen decisiones oportunas en la planificación y gestión integrada de recursos hídricos (GIRH).

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La microcuenca de Yanamarey, situada a 4 750 msnm (9° 39.4' S, 77° 16.2' W) al sur de la Cordillera Blanca y al noroeste de Perú (Figura 1) es parte de la subcuenca Yanayacu, cuyas aguas llegan a la laguna Querococha y al río Yanayacu, que desemboca en el río Santa, al sur de la ciudad de Recuay.



Esta microcuenca (glaciar y no glaciar) abarca un área de 1.55 km<sup>2</sup> y comprende una altitud que va de 4 620 a 5 200 msnm, mientras que el glaciar Yanamarey tiene una superficie de 0.22 km<sup>2</sup>, según la imagen satelital de 2019, que abarca desde 4 777 msnm hasta 5 150 msnm.

Comparado con la superficie del año 1970, ha perdido 1.12 km<sup>2</sup> (Hidrandina, 1989) y el retiro de frente glaciar de 1948 a 2018 es de 974 m (AEGL & ANA, 2019). La microcuenca presenta temperaturas que varían de -0.5 a 6.5 °C en la estación seca y de -1.1 a 5.6 °C en la estación húmeda; la precipitación media anual está entre 1 500 y 2 100 mm/año (AEGL & ANA, 2018).

## Selección de información para la identificación del glaciar

Para evaluar los cambios temporales de glaciares se utilizaron las imágenes de satélite Landsat y Sentinel en periodos secos, obtenidas de la página web (Tabla 1); para determinar la morfometría se usó modelo de elevación digital (o DEM) denominado TanDEM-X del año 2016 con resolución 10 m, que es la misión alemana de observación de la Tierra con radar banda X, proporcionada por Seehaus *et al.* (2019).

**Tabla 1.** Características en las imágenes satelitales utilizada para la identificación de glaciares.

Satélite	Resolución espacial (m)	Fecha	Formato
Landsat 7 ETM+	30	14/07/12	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	03/09/13	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	21/08/14	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	24/08/15	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	26/08/16	GeoTIFF
Landsat 7 ETM+	30	28/07/17	GeoTIFF
Landsat 8 OLI	30	09/09/18	GeoTIFF
Sentinel-2A	10	02/08/19	GeoTIFF
Sentinel-2A	10	06/08/20	GeoTIFF

Para la evaluación del comportamiento hídrico se recopilaron datos hidro-climáticos diarios de la oficina de Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas (SCGL) de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) (Tabla 1 y Mapa 1).

## Determinación de parámetros físicos del glaciar en microcuena

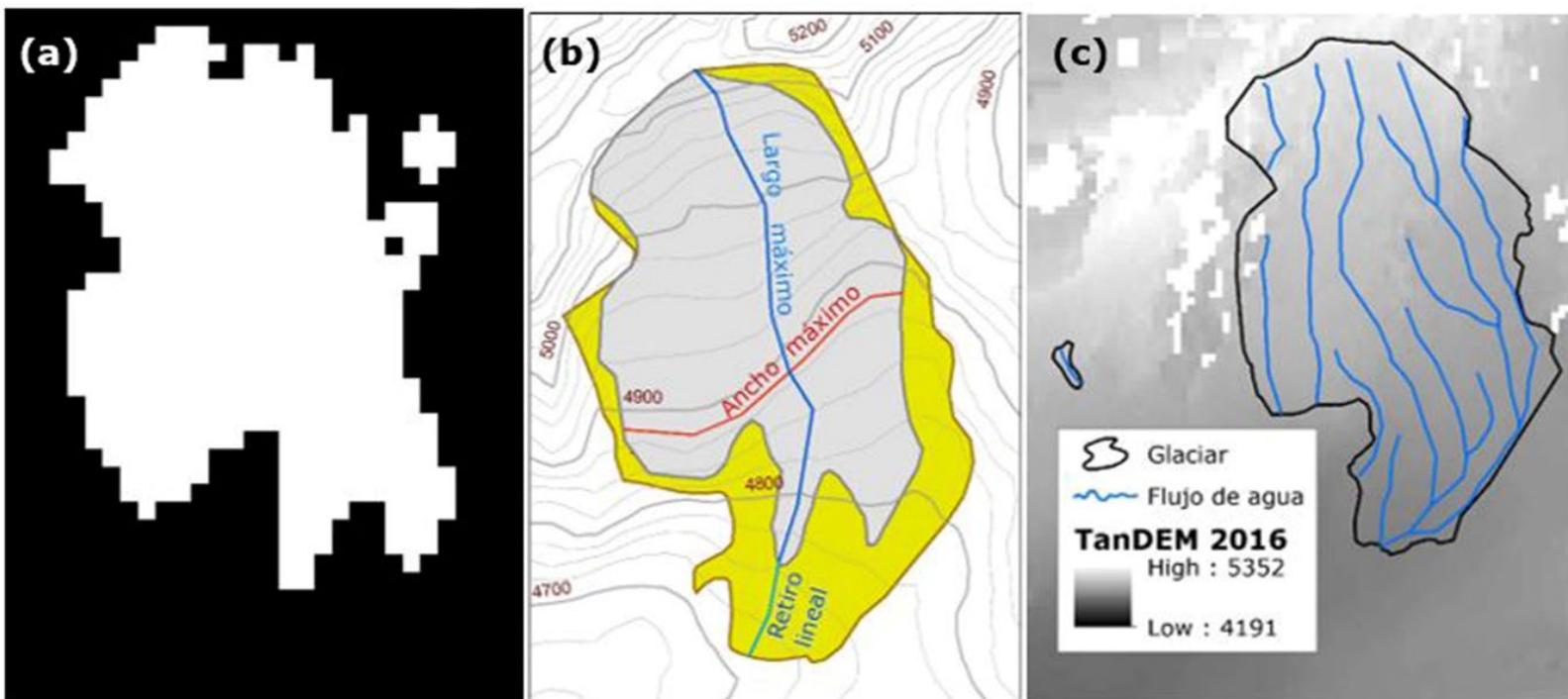
En la dimensión espacial del glaciar se utilizaron plataformas computacionales para determinar la superficie, longitudes y volumen, la cual es plasmada en mapas cartográficos.

**Superficie.** La identificación del glaciar en la imagen satelital (Tabla 1) está basada en el método de Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés) (Dozier, 1989; Hall & Riggs, 2011) aplicado con éxito en la Cordillera Blanca (Silverio & Jaquet, 2005; Racoviteanu, Arnaud, Williams, & Ordon, 2008). Una vez calculado el NDSI, se eligió un umbral mayor a 0.6 para discriminar el hielo limpio del área circundante, considerado óptimo (Racoviteanu *et al.*, 2008). Las imágenes de alta resolución SAS Planet y Google Earth facilitaron la validación de la delimitación y discriminación de la nieve estacional (Guo *et al.*, 2015; Bomshoms-Calvelo, Quispe-Gutiérrez, & Quispe-Vega, 2018). Una vez delimitado el glaciar, se determinó la superficie del glaciar de manera automática en la plataforma ArcMap de ArcGis.

**Longitud.** Se determinaron manualmente las líneas (largo, ancho y retroceso) en el relieve topográfico del TanDEM-X. El largo máximo es la línea que sigue el flujo de agua desde la cumbre más alta hasta el punto más bajo y el ancho máximo es la línea paralela a la curva de nivel,

considerando los extremos más anchos del glaciar (Müller, Caflisch, & Müller, 1977). En tanto, el retroceso del glaciar representa el flujo de agua entre el punto de drenaje del glaciar inicial y el actual, y representa la distancia de pérdida horizontal (Taksi, Condom, Cochachin, & Montalvo, 2022).

**Volumen.** Para determinar el volumen del glaciar se utilizó el modelo matemático Glacier Bed Topography (GlabTop) desarrollado por Linsbauer, Paul y Haeberli (2012), bajo la metodología de Haeberli y Hoelzle (1995), que requiere dato de entrada del contorno glaciar, TanDEM-X de 2016 (Seehaus *et al.*, 2019) y las líneas de escurrimiento de agua sobre el glaciar (Figura 2-a). La información ingresada al GlabTop.tbx se procesa en la plataforma de ArcGIS. El volumen sólido de hielo multiplicado con la densidad ( $0.9 \text{ g/cm}^3$ ) permite obtener el volumen de agua equivalente.



**Figura 2.** Procesos de estimación de geometría glaciar: a) superficie glaciar (color blanco) según NDSI; b) trazo de longitud de largo máximo, ancho máximo y retiro lineal, y c) datos de entrada en estimación de volumen: red de flujo de agua (color azul), contorno glaciar (color negro) y modelo digital de elevación TanDEM-X.

## Estimación hidro-climática de datos faltantes diarios

La serie de datos de precipitación y temperatura es discontinua en varios periodos en la estación Yanamarey y los registros faltantes se completaron con cuatro estaciones circundantes al área de estudio, mientras los datos de caudales son continuos en la estación hidrométrica de Yanamarey (Tabla 2). En la serie de datos se hizo un control de calidad y se retiraron algunos valores incongruentes.

**Tabla 2.** Coordenadas de las estaciones hidro-climáticas.

Núm.	Nombre	Latitud sur	Longitud oeste	Altitud (msnm)	Tipo de estación	Fuente
1	Yanamarey	9° 39.5'	77° 16.2'	4 698	Climática	SCGL-ANA
2	Querococha	9° 43.6'	77° 20.0'	4 012	Climática	SCGL-ANA
3	Uruashraju	9° 35.7'	77° 19.3'	4 693	Climática	SCGL-ANA
4	Shallap	9° 29.6'	77° 20.2'	4 965	Climática	SCGL-ANA
5	Recuay	9° 43.2'	77° 26.9'	3 411	Climática	Senamhi
6	Yanamarey	9° 39.6'	77° 16.6'	4 620	Hidrométrica	SCGL-ANA

**Precipitación.** Se determinó mediante el método de la razón (Alfaro & Pacheco, 2000; Medina, 2008; Ilbay, Fonseca, Quichimbo, & Lara, 2017), que considera estación A (datos completos) y estación B (datos incompletos) (Ecuación (1)):

$$b_j = \left( \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \right) a_j \quad (1)$$

Donde:

$b_j$  = precipitación estimada de la estación B (mm/d) para el día faltante  $j$

$b_i$  = registro precipitación de la estación B (mm/d)

$a_i$  = registro de precipitación de la estación A (mm/d)

$N$  = cantidad de datos disponible de cada estación

**Temperatura.** Para determinar los valores de temperatura faltantes para la estación de Yanamarey se utilizó un gradiente térmico

de 0.8 °C/100 m, estimado por Carey, Huggel, Bury, Portocarrero y Haeberli (2012) para la Cordillera Blanca, en estaciones ubicadas a altitudes superiores a 3 400 msnm.

Los datos reconstruidos de clima y caudal para el periodo 2013-2020 se utilizarán como registros de entrada en la modelización hidroglaciológica.

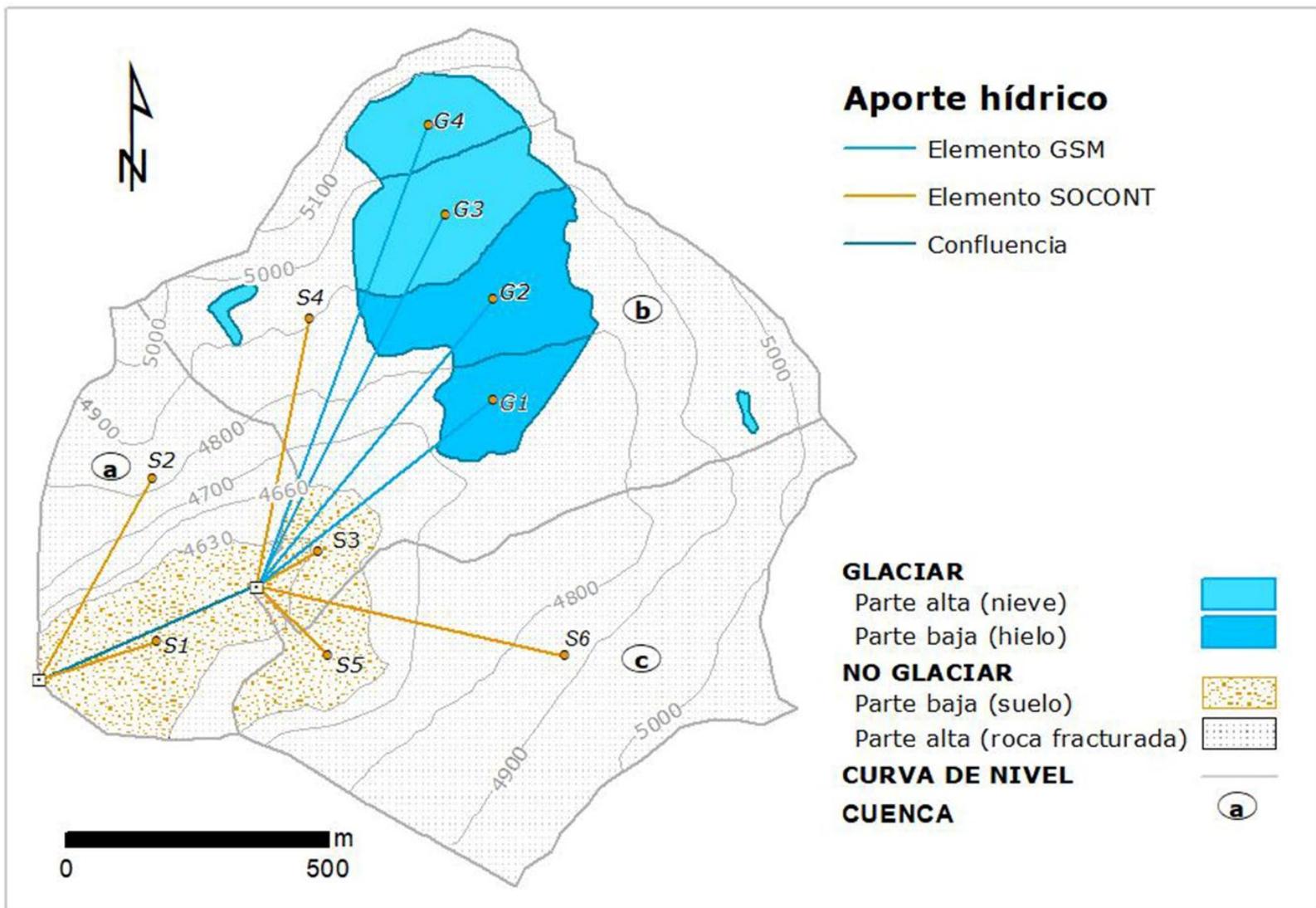
## **Funcionamiento del modelo hidro-glaciológico: GSM y SOCONT**

### **Planteamiento**

El modelo GSM y SOCONT se empleó en el programa hidrológico e hidráulico RS MINERVE, que simula la montaña morfológicamente compleja con presencia de hielo y nieve (García, Paredes, Foehn, Roquier, & Fluixa, 2019). Los procesos de lluvia-escorrentía son simulados en modo conceptual semidistribuido para cuantificar los caudales de fusión de hielo ( $Q_{hielo}$ ), caudal de fusión de nieve ( $Q_{nieve}$ ), intensidad infiltrada por lluvia y nieve derretida ( $Q_{subterráneo}$ ) e intensidad neta de escorrentía superficial por la lluvia ( $Q_{directo}$ ).

El planteamiento en modo semidistribuido se definió en tres cuencas (a, b, c) con bandas de altitud. Del centroide de cada banda considerada se han asociado los elementos de los modelos hidrológicos GSM (zona glaciar) y SOCONT (zona no glaciar), que recogen la contribución de los diferentes tipos de escorrentía en su punto de aforo o medición (García *et al.*, 2019). El rango de banda de altitud define el relieve topográfico como parte alta y baja en cada cobertura predominante. En la zona glaciar se establecieron dos bandas (G3 y G4) ubicadas en la parte alta de cobertura

de nieve y dos bandas (G1 y G2) en la parte baja de cubierta de hielo, dividida en la cota 4 900 msnm, que representa la línea de altitud de equilibrio (ELA) referencial para el año 2016 (AEGL & ANA, 2018). En la zona no glaciar se han creado 06 elementos, tres de ellos se ubicaron en la parte baja (S1, S3, S5) con cobertura de suelo limpio de pendiente moderada (8-25%), y los otros tres en la parte alta (S2, S4, S6), con presencia de roca fracturada de pendiente empinada (de 50 a 75 %) (Figura 3).



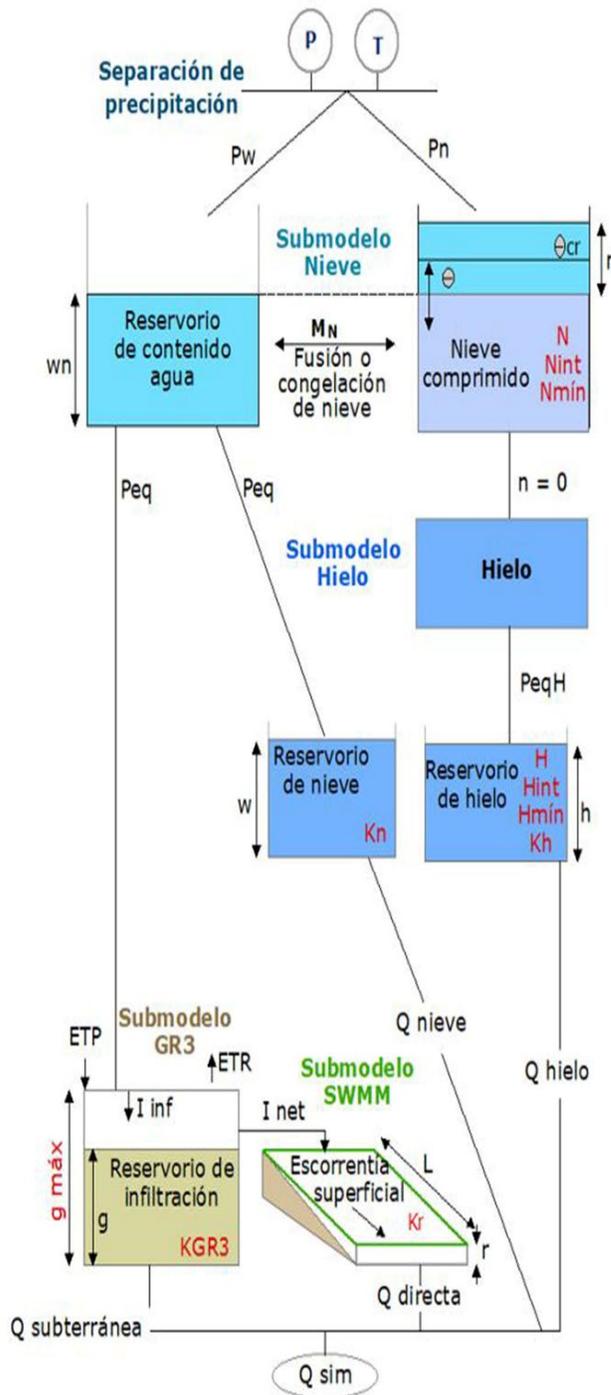
**Figura 3.** Esquema del funcionamiento del modelo hidro-glaciológico en la cuenca por banda de altitud. Fuente: Tacsí, Condom, García, Cochachin y Mejía (2021).

### Evaluación de variables y parámetros del modelo

La simulación hidro-glaciológica de la microcuenca glaciar está basada en los esquemas conceptuales de los modelos hidrológicos GSM y SOCONT,

la identificación de las variables de ingreso y de salida, y los parámetros de calibración.

En el esquema conceptual (Figura 4), el modelo GSM está constituido por submodelos nieve y tres submodelos hielo; el modelo SOCONT consta de dos submodelos nieve, un submodelo GR3 y un submodelo SWMM (Storm Water Management Model) (García *et al.*, 2019). Los dos modelos inician con submodelo de nieve alimentado por precipitación sólida ( $P_n$ ) y precipitación líquida ( $P_w$ ), en función de la temperatura ( $T$ ). La precipitación sólida es la entrada a la nieve compacta y varía su contenido en función del factor de fusión o la acumulación de nieve ( $N$ ). La precipitación líquida con el ingreso de fusión de nieve ( $M_N$ ) produce la precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) almacenada en el reservorio de contenido en agua. El modelo GSM, que consta de submodelo de hielo, recibe datos de submodelo de nieve: a) precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) al reservorio de nieve que produce caudal de nieve ( $Q_{nieve}$ ); b) cuando la altura de la nieve es cero genera el flujo de hielo equivalente ( $P_{eqH}$ ) hacia al reservorio de hielo lo que drena de la cuenca ( $Q_{hielo}$ ) (García *et al.*, 2019). En tanto, en el modelo SOCONT, el  $P_{eq}$  producido en submodelo de nieve es el dato de entrada al submodelo GR3, que calcula la intensidad de infiltración ( $I_{inf}$ ), la evapotranspiración potencial (ETP) con el método de Oudin (2005), la intensidad neta ( $I_{net}$ ) y el caudal subterráneo. La intensidad neta actual en el submodelo superficial (SWMM) genera el de escurrimiento directo ( $Q_{directo}$ ) considerando el coeficiente Strickler ( $K_r$ ) (García *et al.*, 2019). Los dos modelos requieren la extensión de la superficie del glaciar como variable de entrada en el periodo de simulación y la estimación de los parámetros ( $N$ ,  $H$ ,  $T_{cp2}$  y otros).



#### Variables de simulación

P: Precipitación (mm/d)  
T: Temperatura (°C)  
Pw: Precipitación líquida (mm/d)  
Pn: Precipitación sólida (mm/d)  
Peq: Precipitación equivalente (mm/d)  
PeqH: Precipitación equivalente de hielo (mm/d)  
n, w, h: Altura de nieve y hielo (m)  
r: Altura de agua (m)  
wn: Altura de contenido de agua (m)  
Θ: Contenido de agua en la nieve acumulada  
Θcr: Contenido crítico de agua en la nieve acumulada  
g: Nivel de agua en el reservorio de infiltración (m)  
ETP, ETR: Evapotranspiración potencial y real (mm/d)  
I inf: Intensidad de infiltración (mm/d)  
I net: Intensidad neta (mm/d)  
L: Longitud de plano (m)  
Q hielo: Caudal de hielo (m³/s)  
Q nieve: Caudal de nieve (m³/s)  
Q subterránea: Caudal de GR3 (m³/s)  
Q directa: Caudal de SWMM (m³/s)  
Q sim: Caudal total (m³/s)

#### Parámetros de calibración

N, H: Coeficiente de fusión de nieve y hielo (mm/°C/d)  
N int, H int: Coef. de intervalo de fusión de nieve y hielo (mm/°C/d)  
N mín, H mín: Coef. mínimo de fusión de nieve y hielo (mm/°C/d)  
Tc1: Temperatura crítica mínima para precipitación líquida (°C)  
Tc2: Temperatura crítica mínima para precipitación sólida (°C)  
Tcf: Temperatura crítica de fusión de nieve (°C)  
Kn: Coef. De liberación de fusión de nieve (1/d)  
Kh: Coef. De liberación de fusión de hielo (1/d)  
g máx: Altura máxima de infiltración (m)  
K GR3: Coeficiente de liberación de infiltración (1/s)  
Kr: Coeficiente de Strickler (m¹³/s)

**Figura 4.** Esquema conceptual de GSM y SOCONT. Fuente: adecuado del manual técnico de RS MINERVE de García *et al.* (2019) y Tacsí *et al.* (2021).

## Calibración y validación de modelos GSM y SOCONT

La simulación hidro-glaciológica se realiza en un periodo de siete años, donde los cambios de geometría del perímetro del glaciar son bastante pequeños, aunque esta suposición es una simplificación de la compleja dinámica glaciar (Schaepli, Hingray, Niggli, & Musy, 2005).

Para la calibración y validación del modelo se han sugerido (Marek *et al.*, 2016; Bodian, Dezetter, Deme, Djaman, & Diop, 2018) las siguientes alternativas de selección de periodos: 1) dividir los registros en dos partes iguales, o 2) dividir los registros en 2/3 partes para la calibración y 1/3 para la validación. En esta investigación se seleccionó el primer método, considerando dos periodos; es decir, el periodo de calibración (de agosto de 2013 a agosto de 2016) y el periodo de validación (de septiembre de 2016 a agosto de 2020).

La simulación de los modelos GSM y SOCONT se hizo mediante la calibración automática, que implica el cálculo de la predicción de error con procedimiento automático de optimización para buscar valores de parámetros que optimizan el valor de la función objetivo (FO) (García *et al.*, 2019). En la función objetivo (FO) se priorizaron los cuatro indicadores con pesos ponderados que maximizan a los indicadores Nash (NSE), Nash-In (NSE-LN) y Pearson (PCC), y minimizan al error pico normalizado (NPE), lo que se muestra en la Ecuación (2):

$$FO = 0.4 NSE + 0.2 NSE - LN + 0.2 PCC + 0.2 NPE \quad (2)$$

Donde:

$FO$  = función objetivo

0.4, 0.2, 0.2, 0.2 = pesos asignados

NSE, NSE-LN, PCC, NPE = indicadores estadísticos de medidas de bondad de ajuste

Los dos modelos se calibraron con el algoritmo del método Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA) (Duan, Sorooshian, & Gupta, 1994; García *et al.*, 2019), que optimiza una función objetivo con sucesivas combinaciones de parámetros y que convergen en una solución.

## Resultados

### Parámetros físicos del glaciar Yanamarey

Las características físicas estimadas de la imagen satelital con técnicas geo-informáticas (Paul *et al.*, 2009) corresponden a longitud, superficie y volumen.

**Longitud horizontal.** Desde 2013, las dimensiones de longitud en el glaciar han cambiado de tamaño. Las medidas (largo máximo, ancho máximo) se han reducido a un ritmo de 26 m/año y 11.6 m/año, respectivamente; mientras, el retroceso lineal aumenta anualmente a 22.5 m/año. Así, en 2020, se tiene un largo de 728 m, ancho de 466 m y retroceso lineal de 155 m (Figura 5-c).

**Superficie.** La delimitación del glaciar y la tendencia de superficie en la microcuenca Yanamarey obtenida de las imágenes de Landsat y Sentinel del periodo 2013-2020 se visualizan en las Figuras 5<sup>a</sup> y 5d. En el mapa se aprecian los cambios de tamaño de masa de hielo (reducción)

y el área no glaciada de la microcuenca (incremento) a razón de 18 108 m<sup>2</sup>/año en ambos. Además, la tendencia decreciente del glaciar continuo es estimable para los años futuros con la Ecuación (3), pero los valores reales de tamaño pueden aproximarse con la hidro-glaciología según el escenario de clima futuro (Tacsí *et al.*, 2021):

$$Y = -18\,108x + 36\,777\,794 \quad (3)$$

Donde:

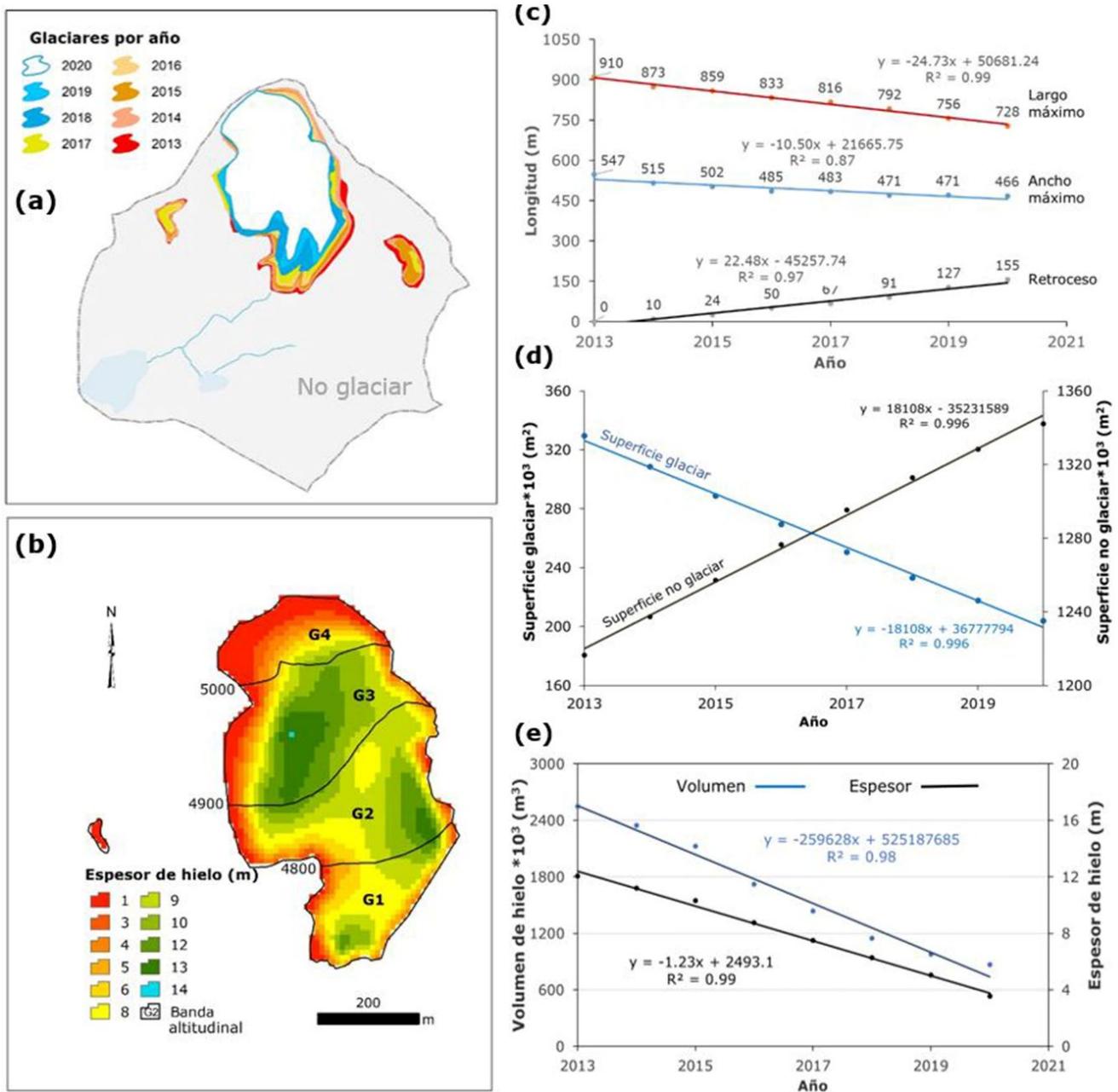
Y = superficie glaciada (m<sup>2</sup>)

X = tiempo (años)

**Volumen.** El volumen sólido del glaciar estimado corresponde a lo siguiente:

1. Glaciar del año 2016 (Figura 5-b), que calculado con el modelo matemático GlabTop es de 1 723 434 m<sup>3</sup> y espesor promedio de 8.8 m, donde las bandas G3 y G2 superan en 630 000 m<sup>3</sup> de volumen y 10 m de espesor; a la vez, en el mapa se observan las mayores alturas de espesor (14, 13 y 12 m) en las bandas 3, 2 y 1, respectivamente.

2. Volumen de glaciares de los años subsiguientes (Figura 5e). Se utilizaron los valores anuales de caudal de fusión de hielo (m<sup>3</sup>/s) y altura de derretimiento de hielo (m) obtenidos del modelo hidro-glaciológico (desarrollado en este estudio). En caso del caudal, es convertido a volumen líquido y luego a volumen sólido. Por lo tanto, el volumen y espesor del año 2016 (obtenido en GlabTop) se suman (hasta 2020) o restan (hasta 2013) (Figura 5e). Ploteados sus datos (volumen de hielo y espesor) de cada año, ambos presentan tendencias decrecientes de 259 628 m<sup>3</sup>/año y 1.23 m/año.



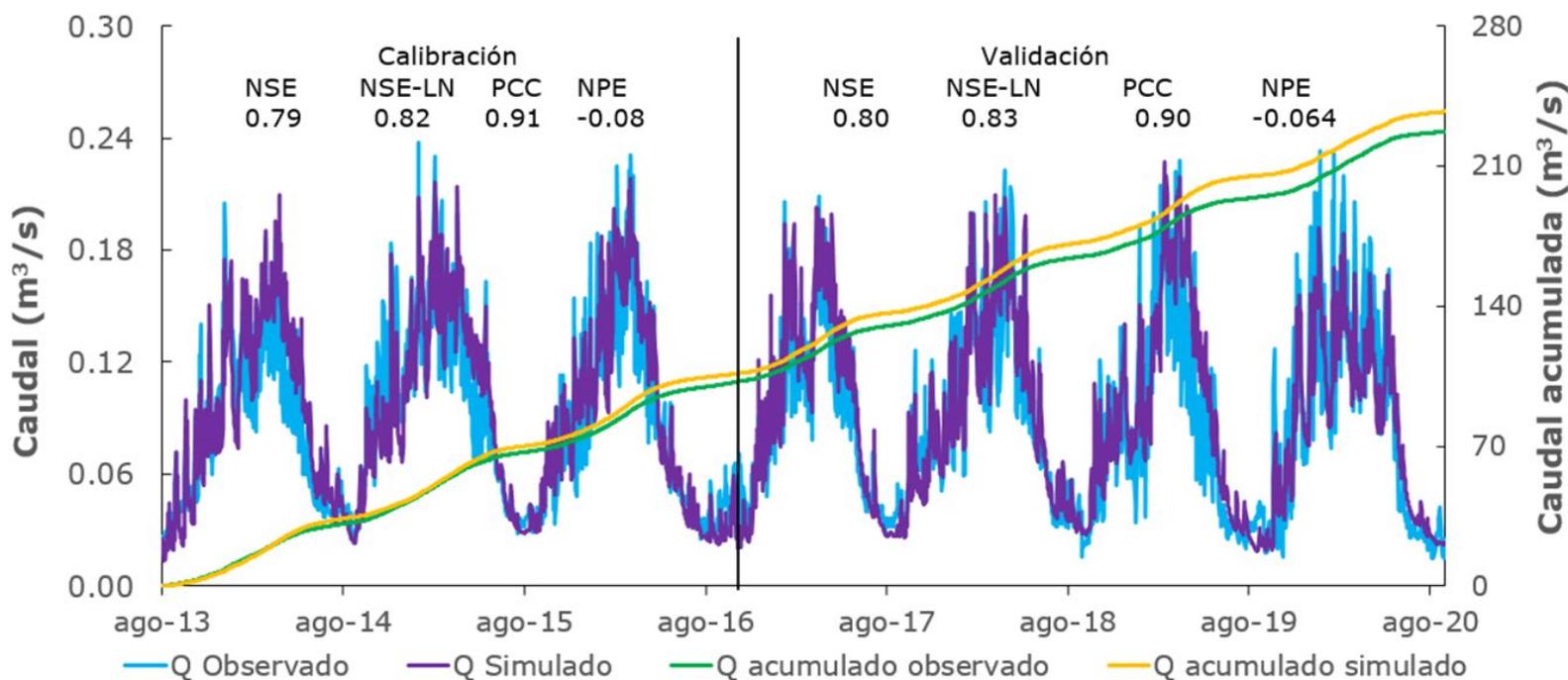
**Figura 5.** Comportamiento de parámetros físicos entre 2013 y 2020: a) mapa de glaciares anuales obtenido de imagen satelital; b) mapa de esesor de hielo del año 2016, distribuido por bandas de altitud; c) tendencia de longitud (largo, ancho y retroceso lineal); d) tendencia de superficie glaciar y no glaciar; e) tendencia de volumen y esesor.

## Calibración del modelo hidro-glaciológico

La calibración y validación se realizó a los caudales de la estación de aforo de la microcuenca Yanamarey, que representa el aporte de flujo de la zona glaciar y no glaciar. Después se evaluaron los parámetros hídricos del modelo GSM y SOCONT en el análisis de sensibilidad, e influyen significativamente a los parámetros H ( $\pm 12$  % de incertidumbre), N ( $\pm 3$  %), KG3 ( $\pm 1.5$  %) y Tcf (1.8 %). En la corrida iterativa de simulación en la plataforma RS MINERVE se obtienen los valores del parámetro que optimiza la mejor combinación (Tabla 3). También se han utilizado con éxito con el modelo GSM y SOCONT para otros estudios (Muñoz, 2017). En la Figura 6 se muestra la comparación del hidrograma de caudal diario (observado y simulado). Los indicadores estadísticos muestran Nash (NSE) superior a 0.79, coeficiente de correlación Pearson (PCC) mayor a 0.82 y error pico normalizado (NPE) mayor a -0.08. Los valores de indicadores estadísticos seleccionados se sintetizan en la función objetivo (FO) de 0.65 en representar el comportamiento de caudales del periodo 2013-2020.

**Tabla 3.** Parámetros de GSM y SOCONT obtenidos como resultado del proceso de calibración automática en RS MINERVE.

Parámetro	SOCONT	GSM	Unidad	Descripción
N	12	12	mm/°C/d	Grado día nieve
Nint	20	20	mm/°C/d	Intervalo de grado día
Nmín	4	4	mm/°C/d	Mínimo de grado día
H	-	5	mm/°C/d	Grado día glaciación
Hint	-	6	mm/°C/d	Intervalo de grado día
Hmín	-	1	mm/°C/d	Mínimo de grado día
Tcp1	-0.5	-1	°C	Temperatura crítica mínima líquida
Tcp2	0.3	0.3	°C	Temperatura crítica máxima sólida
Tcf	-2.5	-2.5	°C	Temperatura crítica nieve/hielo
Kh	-	0.05	1/d	Coefficiente de liberación por fusión de hielo
Kn	-	1	1/d	Coefficiente de liberación por fusión de nieve
TethaCri	0.1	0.1	-	Contenido de agua relativo crítico en nieve acumulada
bp	0.0125	0.0125	d/mm	Coefficiente de fusión debido a precipitación líquida

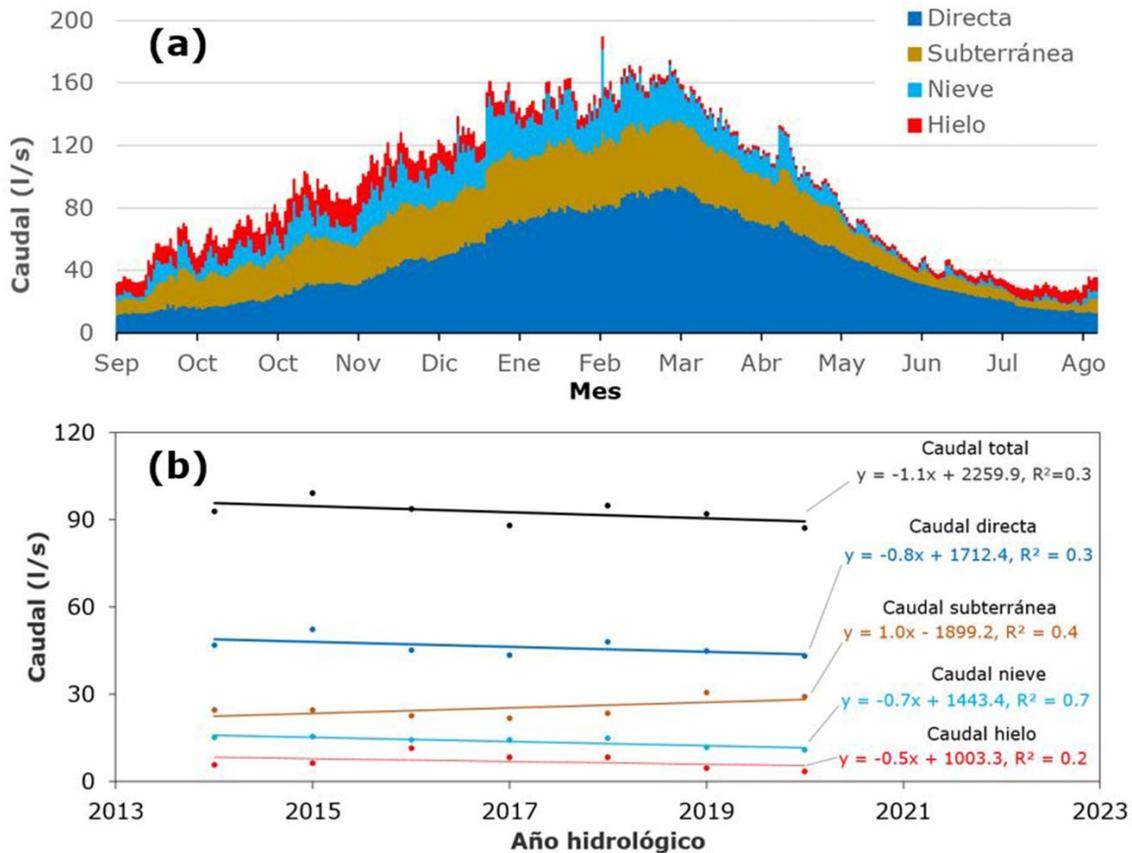


**Figura 6.** Comparación del hidrograma de caudales diarios observados y simulados con GSM y SOCONT en la estación Yanamarey, periodo 2013-2020 (NSE es coeficiente de Nash-Sutcliffe, NSE-LN es coeficiente de Nash para Logaritmos, PCC es coeficiente de correlación Pearson y NPE es error pico normalizado).

## Contribución hídrica en la microcuenca Yanamarey

La contribución hídrica diaria producida en la microcuenca Yanamarey se muestra en el hidrograma de caudales (Figura 7a). El caudal anual diario estimado es de 93 l/s, distribuidos en 7 l/s (8 % del total) de caudal de hielo, 14 l/s (15 %) de caudal de nieve, 46 l/s (50 %) de caudal directa, y 25 l/s (27 %) del caudal subterráneo o flujo base. Comparada con el

aporte anual del hielo derretido de 12 % estimada por Mark y Seltzer (2003) para una superficie de 0.52 km<sup>2</sup> del glaciar Yanamarey, difiere en 4 % al valor estimado en este estudio, esto en razón de que el tamaño del glaciar es menor, considerado de 0.26 km<sup>2</sup> en el modelo hidroglaciológico. Además, el caudal máximo para la época húmeda es 189 l/s (29 de febrero) y 174 l/s (25 de marzo), y en época seca es 82 l/s (30 de octubre) y 77 l/s (29 de octubre). En tanto, en la Figura 7b se visualiza el comportamiento de los cuatro tipos de caudales para los siete años evaluados, y se presentan las tendencias descendentes de 0.8 l/s/año (caudal directo), 0.7 l/s/año (caudal de nieve), 0.5 l/s/año (caudal de hielo) y 1.1 l/s/año (caudal total); y la tendencia ascendente de 1.0 l/s/año (caudal subterráneo). Dicha disminución evidente de la cantidad de agua de la fusión del glaciar y la precipitación tendrá impacto en esta cuenca alta en recibir menos aporte hídrico.



**Figura 7.** Caudales simulados de clima reconstruido en el periodo 2013-2020: a) hidrograma de caudal diario de la microcuenca Yanamarey; b) tendencia de los caudales (hielo, nieve, subterránea, directa y total).

En la Tabla 4 se representan los cuatro tipos de caudales diarios (anual, máximo, mínimo, estación (seca y húmeda)). Comparando los aportes de caudales entre la estación húmeda de noviembre a enero (NDE) y la estación seca de mayo a julio (MJJ) presentan lo siguiente: caudal de hielo de 5.4 veces; caudal de nieve de 3.6 veces; caudal subterráneo de 2.2 veces, y caudal directo de 1.1 veces. Además, la contribución hídrica del glaciar (hielo y nieve) en la estación seca es 13.4 % al caudal anual y en la estación húmeda es 32.1 %; la contribución

mensual de la fusión de hielo, en el mes más seco, aporta con 21 % (7 l/s) en agosto y el mayor deshielo es en noviembre con 15 l/s (17 % del mes).

**Tabla 4.** Caudal diario (anual, máximo, mínimo, y otros) en l/s.

Tipo de caudales	Anual	Máximo	Mínimo	Estación seca		Estación húmeda	
				MJJ <sup>1</sup>	ASO <sup>2</sup>	NDE <sup>3</sup>	FMA <sup>4</sup>
Hielo	7.5	18	1	2	9	13	4
Nieve	14.7	53	0	6	8	21	23
Subterránea	25.8	47	4	15	15	33	39
Directa	46.6	95	11	42	18	45	82
Total	93.4			65	50	112	148

<sup>1</sup>MJJ = mayo, junio, julio

<sup>2</sup>ASO = agosto, septiembre, octubre

<sup>3</sup>NDE = noviembre, diciembre, enero

<sup>4</sup>FMA = febrero, marzo, abril

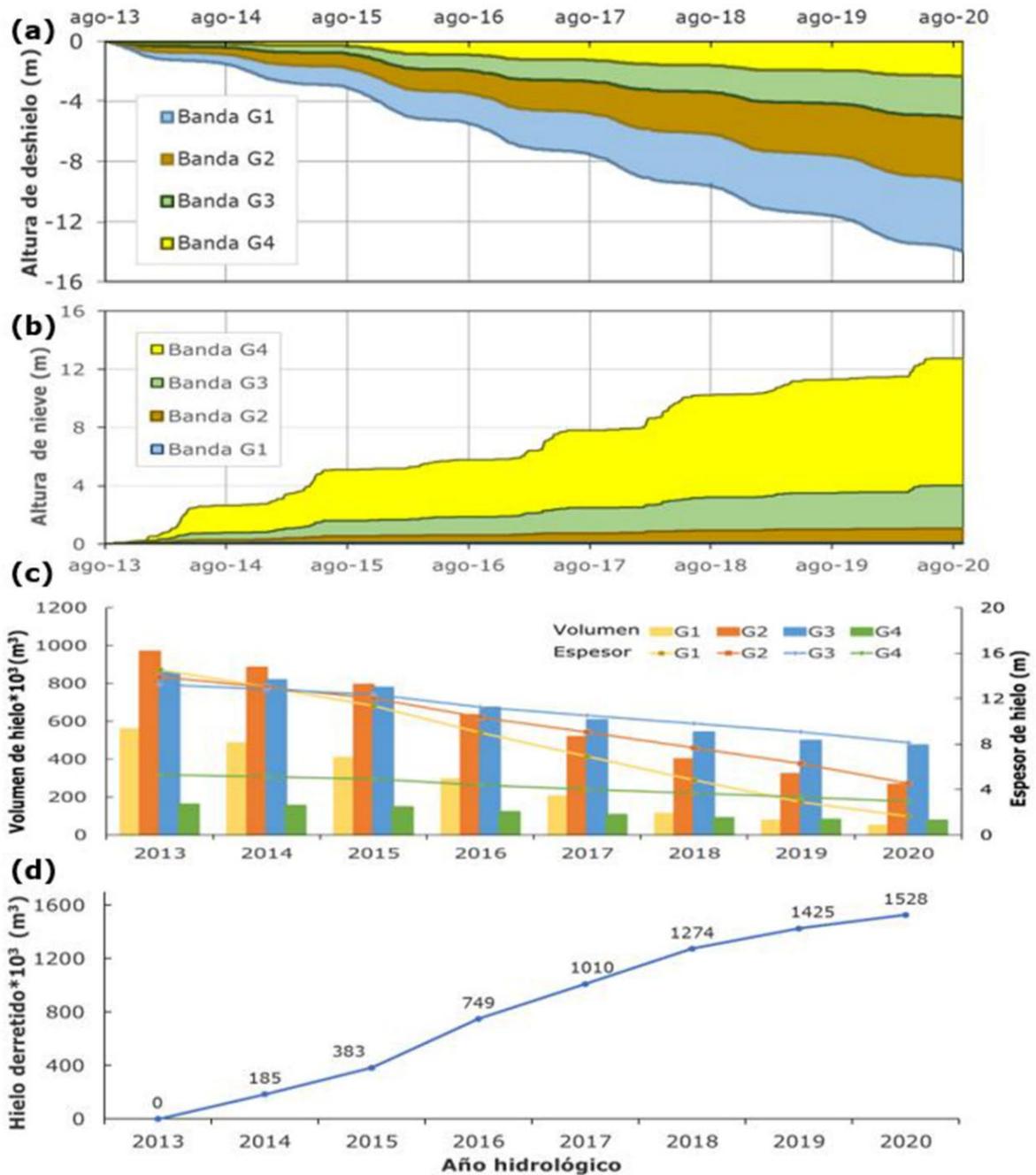
## Comportamiento de procesos hídricos en la microcuenca

### Procesos glaciológicos en zona glaciar

Los procesos en la masa glaciar de acumulación de nieve por la precipitación sólida y la pérdida por fusión de hielo por acción de la temperatura presentaron los siguientes comportamientos.

La tendencia durante y al final de los siete años en las cuatro bandas muestra: en la Figura 8a, las alturas de fusión del hielo alcanzan -14.0 m

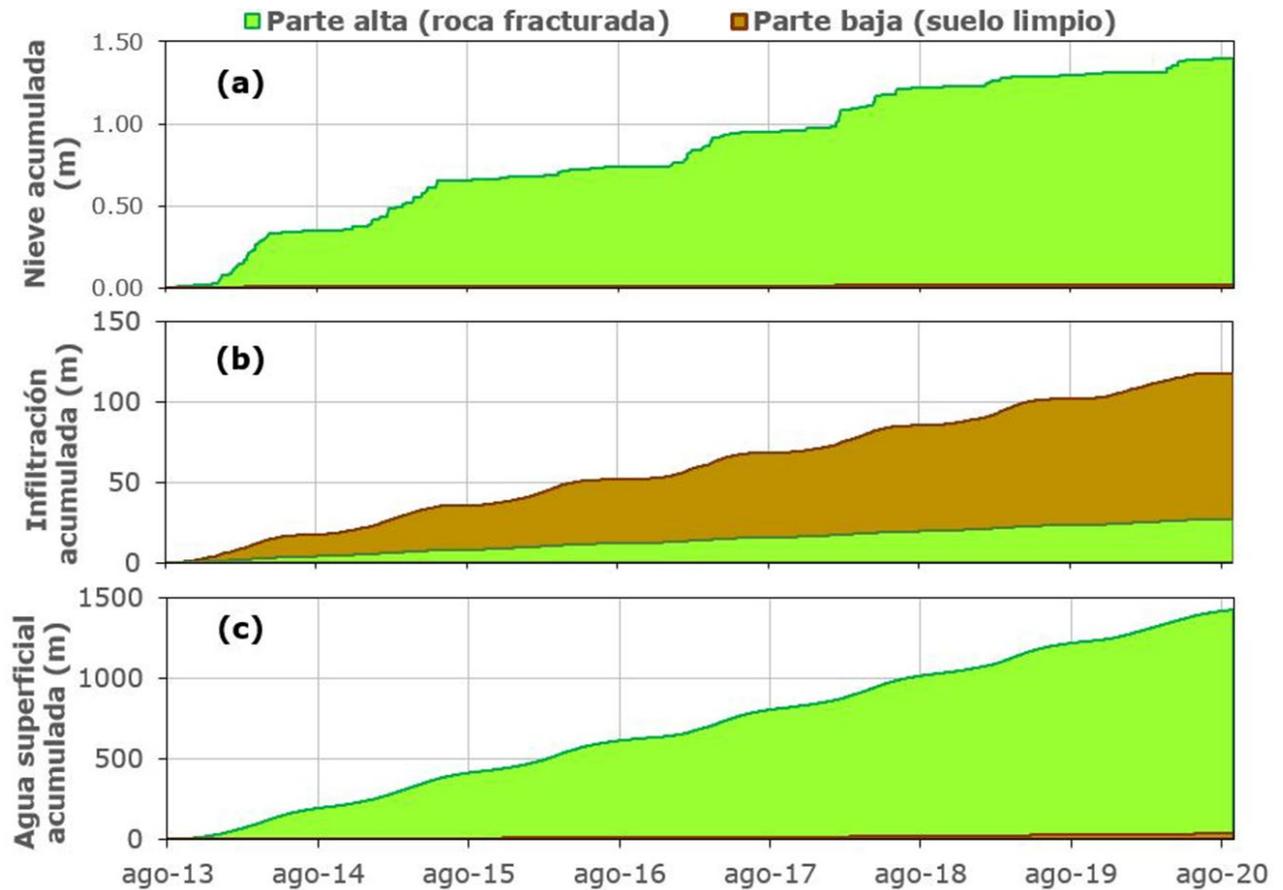
(banda G1), -9.4 m (banda G2), -5.1 m (banda G3) y -2.4 m (banda G4); el ritmo anual de fusión de hielo es -3.4 m/año en la parte baja (G1 y G2) y -1.1 m/año en la parte alta (G3 y G4); y la forma de tendencia escalonada, generada por la estación del año, húmeda (casi plana) y seca (empinada). Esta diferencia de pérdida de hielo y tamaño de escalonada se atribuye a la presencia de la nieve acumulada a cada altitud. En la Figura 8b, la altura acumulada de nieve alcanza 0.30 m (banda G1), 1.08 m (banda G2), 4.00 m (banda G3) y 12.74 m (banda G4); y la recarga anual de nieve es 2.40 y 0.20 m/año en la parte alta y baja, respectivamente. En tanto, la forma escalonada se distingue en banda G4 con acumulación alta de nieve entre los meses de enero a abril y escasa acumulación de nieve en mayo a diciembre; y en las bandas G3, G2 y G1 disminuye la forma escalonada. La Figura 8c muestra los cambios de los volúmenes y espesor de hielo por banda de altitud de 2013 a 2020. En 2013, el volumen total de hielo de 2 547 000 m<sup>3</sup> y espesor promedio de 12 m se distribuyen en banda G1 de 22 % de volumen con 15 m de espesor; G2 de 38 % de volumen con 14 m; G3 de 34 % volumen con 13 m, y G4 de 6 % volumen con 5 m. Además, al final del periodo, quedan disponibles 867 000 m<sup>3</sup> de volumen de hielo y espesor promedio de 4.3 m, distribuyendo en la banda G2 de 266 000 m<sup>3</sup> con 4.5 m de espesor y en la banda G4 de 77 000 m<sup>3</sup> y 2.9 m. En la Figura 8d se observa el volumen acumulado del derretimiento de hielo de 1 528 m<sup>3</sup> al 2020; el incremento más notorio es el año hidrológico de 2015 a 2016.



**Figura 8.** Evaluación de procesos glaciológicos entre los años 2013 y 2020: a) altura de fusión de hielo según altitud; b) altura de nieve acumulada según altitud; c) disponibilidad de hielo de volumen y espesor por bandas de altitud; d) volumen acumulado de hielo derretido por año hidrológico.

## Procesos hidrológicos en zona no glaciar

En la Figura 9 se visualizan en los siete años la altura acumulada de la nieve, agua infiltrada y agua superficial, alcanzando en la parte alta (roca fracturada) 1.39, 27 y 1 425 m, y en la parte baja (suelo limpio) 0.02, 118 y 34 m, respectivamente. La fuerte diferencia de valores entre ellos se relaciona con el tipo de cobertura y la pendiente del terreno; a la vez, forma de ondulaciones, que ascienden más rápido en la estación húmeda que en la estación seca. En cuanto a la acumulación de la altura ponderada anual en la microcuenca, es de 0.17 m/año de nieve, 5.7 m/año de infiltración y 175 m/año de agua superficial.



**Figura 9.** Evaluación de los procesos hidrológicos en zona no glaciar entre los años 2013 y 2020: a) nieve acumulada, b) agua infiltrada, c) agua acumulada.

## Discusión

La incertidumbre de los valores de los parámetros físicos de la microcuenca Yanamarey se ha logrado reducir. En el caso del contorno glaciar obtenido con imagen Landsat de resolución 30 m, se habrían subestimado porciones del perímetro; el más notorio fue el sector bajo del glaciar que cambia de forma rápida. Así, se incorporaron los datos registrados con la topografía de la parte frontal del glaciar (AEGL & ANA,

2019) para considerar las singularidades de los contornos del glaciar afectadas por relieve y geoformas (Taksi *et al.*, 2022). En tanto, el trazo manual de las medidas de líneas (largo, ancho) se realizó en relieve glaciar generado con DEM ALOS y TanDEM-X de resolución espacial de 30 y 10 m, respectivamente; pero, para reducir la precisión, se eligió TanDEM-X, que representa a mayor detalle las líneas de escurrimiento de agua y las líneas de curva de nivel. Comparada la superficie glaciar Yanamarey entre la imagen Landsat 7 con medición de equipo topográfico (parte baja del glaciar) difiere 16 % (UGRH & ANA, 2015); mientras que con imagen Sentinel de 10 m de resolución y la medición completa del glaciar Pastoruri con equipo topográfico difiere 10 % (AEGL & ANA, 2021a); en caso de volumen calculado, con el modelo GlabTop la precisión de volumen según Linsbauer *et al.* (2012) es  $\pm 30\%$  y la profundidad con equipo de radar en glaciar Artesonraju (Chisolm, 2016) es 8 %.

En la modelización hidro-glaciológica se ha tenido cuidado en la selección de los valores de parámetros del modelo GSM y SOCONT; es necesario el análisis de sensibilidad debido a que el glaciar utiliza el grado día de hielo y nieve que está influenciado por la temperatura en el entorno glaciar, obteniendo 12 mm/°C/d en nieve y 5 mm/°C/d en hielo para una temperatura crítica máxima sólida de 0.3 °C. Presenta cierta similitud comparada con el glaciar Zongo de Bolivia de 350 mm/°C/mes en hielo y 550 mm/°C/mes (nieve) de 0.5 °C (Escobar, Lima, Purkey, & Yates, 2013), pero difiere con lo obtenido para glaciares de la cordillera Blanca en la cuenca Santa de 380 mm/°C/mes (nieve) y 600 mm/°C/mes (hielo) con 1.45 °C (Condom *et al.*, 2012). Esta diferencia de valores en la cordillera Blanca se relaciona, en lo evaluado por Condom *et al.* (2012), a glaciares de diferentes tamaños (de 0.005 a 10 km<sup>2</sup>) situados en rango de altitudes de 4 200 a 6 768 msnm; en tanto, en el glaciar Yanamarey,

como menciona Suarez (2007), la temperatura local influye por presentar un mayor desnivel (de 4 700 a 5 200 msnm) en tamaño pequeño (0.26 km<sup>2</sup>) y situarse en la parte más meridional de la cuenca Santa.

Respecto al comportamiento de la tendencia negativa de los caudales que se descargan en la microcuenca, sigue la misma evolución hidrológica estimada por Baraer *et al.* (2012) para la subcuenca Yanayacu, donde se encuentra la microcuenca Yanamarey. Mientras tanto, en cuanto a estimaciones de los tipos de caudales, solo el caudal de hielo ha sido estimado por Mark y Seltzer (2003); de los caudales (directo, nieve y subterránea) aún no se tienen antecedentes en esta microcuenca, por lo que los datos obtenidos pueden considerarse de referencia para futuras investigaciones.

En tanto, en los procesos hidro-glaciológicos en la microcuenca en la zona glaciaria, la oficina de SCGL (AEGL & ANA, 2018) realiza el análisis de balance de masa y las mediciones del año hidrológico 2017-2018 en el glaciar. Presentan una pérdida de altura de hielo de ~ 2.7 m a la altitud de 4 750 msnm y la acumulación de altura de nieve de ~ 0.9 m en 4 950 msnm. Al compararse con el presente estudio, la pérdida y acumulación difieren en 22 y 19 %, respectivamente. Además, en lo obtenido, el mayor derretimiento de hielo en el año hidrológico 2015-2016 coincide con el evento de El Niño (Senamhi, 2021).

En zona no glaciaria, el suelo limpio (producto de la morrena frontal por depósito glaciario), según lo mencionado en UGRH-E (1993), presenta una matriz arenosa limosa con baja presencia de arcilla, a la que corresponde la altura de infiltración de 0.05 m/d (0.19 cm/h), que comparada con la infiltración estimada en Green-Ampt por Chow, Maidment y Mays (1994) es suelo marga arenosa arcillosa, que tiene

coherencia al tipo de suelo, con cierta presencia de arcilla por la compactación glaciaria en cientos de años.

## Conclusiones

La investigación ha estimado la contribución hídrica representativa y los procesos hidro-glaciológicos de la microcuenca Yanamarey con presencia glaciaria, usando los modelos hidrológicos GSM y SOCONT en la plataforma RS MINERVE.

Los registros hidro-climáticos reconstruidos a una resolución temporal diaria se usaron en la calibración del modelo hidro-glaciológico. Los resultados indican que el caudal anual de 93.4 l/s está conformado por un 8 % de la fusión de hielo (7.5 l/s), un 15 % de la fusión de nieve (14.7 l/s), un 27 % de flujo base o agua subterránea (25.8 l/s) y un 50 % de escorrentía directa (46.6 l/s). En tanto, la contribución del glaciar (hielo y nieve) se distingue de 31 % en el periodo de meses de agosto a enero y 16 % en febrero a julio. Respecto a los procesos hídricos, se diferencian por su ubicación y tipo de cobertura. La relación entre las alturas acumuladas de parte alta y baja fue la siguiente: la fusión de hielo de 1:3.1; acumulación de nieve en el glaciar de 12:1; acumulación de nieve en no glaciar de 80:1; agua infiltrada acumulada de 1:4, y agua superficial acumulada de 41:1. Mientras, en los procesos geométricos, el glaciar se reduce en superficie 18 108 m<sup>2</sup>/año y en volumen en 259 628 m<sup>3</sup>/año.

Finalmente, la contribución hídrica por los procesos glaciológicos e hidrológicos en la microcuenca Yanamarey refleja una tendencia de disminución de aporte de agua hacia el río Santa y sus consecuencias en

los próximos años serán el déficit de agua en comunidades y ciudades con cuencas glaciares.

## Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen a la Oficina de Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua por proporcionar los datos hidrometeorológicos. Asimismo, agradecen al IRD de Francia por la asesoría técnica en el tema de modelización hidro-glaciológica.

## Referencias

- AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2018). *Evaluación de la disponibilidad de recursos hídrico en glaciares en un contexto de cambio climático en las cordilleras del Perú*. Huaraz-Ancash, Perú: Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua.
- AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2019). *Retroceso glaciar en la cordillera Blanca 1948-2018*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3770>
- AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2020). *Cuantificación de glaciares de la cordillera Blanca*. Huaraz-Ancash, Perú: Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua.

AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2021a). *Pastoruri 40 años de estudios glaciológicos*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4779>

AEGL & ANA, Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas & Autoridad Nacional del Agua. (2021b). *Reserva hídrica de glaciares del Perú*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4802>

Alfaro, R., & Pacheco, R. (2000). Aplicación de algunos métodos de relleno a series anuales de lluvia de diferentes regiones de Costa Rica. *Revista Tópicos Meteorológicos*, 7(1), 41-51. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/read/13138363/aplicacion-de-algunos-metodos-de-relleno-a-series-anuales-de-lluvia>

Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K., Portocarrero, C., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150. DOI: 10.3189/2012JoG11J186

Bennett, J. C., Robertson, D. E., Ward, P. G. D., Hapuarachchi, H. A. P., & Wang, Q. J. (2016). Environmental modelling & software calibrating hourly rainfall-runoff models with daily forcings for stream flow forecasting applications in meso-scale catchments. *Environmental Modelling and Software*, 76, 20-36. DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.11.006

Bodian, A., Dezetter, A., Deme, A., Djaman, K., & Diop, A. (2018). Future climate change impacts on streamflows of two main west Africa river basins: Senegal and Gambia. *Hydrology*, 18. DOI: 10.3390/hydrology5010021

- Bomshoms-Calvelo, M., Quispe-Gutiérrez, N., & Quispe-Vega, K. (2018). Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/2330>
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3-4), 733-767. DOI: 10.1007/s10584-011-0249-8
- Chisolm, R. E. (2016). *Climate change impacts and water security in the Cordillera Blanca, Peru* (tesis de doctorado). University of Texas at Austin, USA. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2152/41583>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill (original work published in 1988).
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, C., Suarez, W., Ramos, C., Apaéstegui, J., Tacsi, A., & Gomez, J. (2012). Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: A case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, 37(4), 442-459. DOI: 10.1080/02508060.2012.706773
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of Alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90101-6
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3-4), 265-284. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90057-4

- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., & Yates, D. (2013). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia. *Aqua-LAC*, 5, 2-4. DOI: 10.29104/phi-aqualac/2013-v5-2-03
- García, J., Paredes, J., Foehn, A., Roquier, B., & Fluixa, J. (2019). *RS MINERVE - Technical manual V2.21*. Sion Switzerland: Centre de Recherche sur L'environnement Alpin (CREALP). Recuperado de <https://www.crealp.ch/rs-minerve/>
- Guo, W., Liu, S., Xu, J., Wu, L., Shanguan, D., Yao, X., Wei, J., Bao, W., Yu, P., Liu, Q., & Jiang, Z. (2015). The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 61(226), 357-372. DOI: 10.3189/2015JoG14J209
- Haeberli, W., & Hoelzle, M. (1995). Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: A pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 206-212. DOI: 10.1017/S0260305500015834
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2011). Normalized-Difference Snow Index (NDSI). In: *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*, 779-80. Netherlands: Springer. DOI: 10.1007/978-90-481-2642-2
- Hidrandina, S. A. (1989). Inventario de glaciares del Perú. En: *Concytec. San Borja-Perú* (278 pp.). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4973>
- Ilbay, M., Fonseca, K., Quichimbo, A., & Lara, R. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación en la subcuenca del río Patate. *Revista Bases de La Ciencia*, 2, 37-48. DOI: 10.33936/rev\_bas\_de\_la\_ciencia.v2i3.1079

- Khadka, M., Kayastha, R. B., & Kayastha, R. (2020). Future projection of cryospheric and hydrologic regimes in Koshi River basin, Central Himalaya, using coupled glacier dynamics and glacio-hydrological models. *Journal of Glaciology*. DOI: 10.1017/jog.2020.51
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haeberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research*. DOI: 10.1029/2011JF002313
- López-Moreno, J. I., Valero-Garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-Molina, C., & Bazo, J. (2017). Science of the total environment hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru). *Science of the Total Environment*, 579, 272-282. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.107
- Marek, G. W., Gowda, P. H., Evett, S. R., Baumhardt, R. L., Brauer, D. K., Howell, T. A., Marek, T. H., Srinivasan, R., & Point, I. (2016). Calibration and validation of the SWAT model for predicting daily ET over irrigated crops in the Texas High Planins using lysimetric data. *Evapotranspiration: Monitoring & Modeling in Multiple Lnd Uses*, 59(2), 611-622. DOI: 10.13031/trans.59.10926
- Mark, B., & Seltzer, G. (2003). Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the cordillera Blanca, Perú. *Journal of Glaciology*, 165(271-281). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3366>
- Medina, R. D. (2008). *Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11059/21>

- Merz, R., Parajka, J., & Blo, G. (2009). Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, 45(September), 1-15. DOI: 10.1029/2009WR007872
- Müller, F., Caflisch, T., & Müller, G. (1977). Instructions for compilation and assemblage of data for a world glacier inventory. Recuperado de [https://www.wgms.ch/downloads/Mueller\\_etal\\_UNESCO\\_1977.pdf](https://www.wgms.ch/downloads/Mueller_etal_UNESCO_1977.pdf)
- Muñoz, R. (2017). Impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la subcuenca Quillcayhuanca, Perú (tesis de maestría en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/80276>
- Muñoz, R., Huggel, C., Drenkhan, F., Vis, M., & Viviroli, D. (2021). Comparing model complexity for glacio-hydrological simulation in the data-scarce Peruvian Andes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37(January). DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100932
- Oudin, L. (2005). *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. Paris, France: These, Ecole Nationale Du Genie Rural, Des Eaux et Des Forets. Recuperado de <https://theses.hal.science/pastel-00000931/>
- Paul, F., Barry, R. G., Cogley, J. G., Frey, H., Haeberli, W., Ohmura, A., Ommanney, C. S. L., Raup, B., Rivera, A., & Zemp, M. (2009). Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 50(53), 119-126. DOI: 10.3189/172756410790595778

- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordon, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca , Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186), 499-510. DOI: 10.3189/002214308785836922
- Ramírez, E. (2008). Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. *Revista Virtual REDESMA*, 2(3), 49-61. Recuperado de <https://cebem.org/revistaredesma/vol5/articulo6.php?id=c1>
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1), 73-117. DOI: 10.5194/hessd-2-73-2005
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – Mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 2537-2556. DOI: 10.5194/tc-13-2537-2019
- Senamhi, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2021). *Fenómeno El Niño/La Niña* (Boletín 06, 06, junio). Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02216SENA-84.pdf>
- Silverio, W., & Jaquet, J. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Perú) using satellite imagery. *Elservier*, 95, 342-350. DOI: 10.1016/j.rse.2004.12.012
- Suarez, W. (2007). Le bassin versant du fleuve Santa (Andes du Pérou): dynamique des écoulements en contexte glacio-pluvio-nival. *Thèse*, l'Universite Montpellier-France. Recuperado de <https://theses.fr/2007MON20185>

- Tacsi, A., Condom, T., Cochachin, A., & Montalvo, N. (2022). Seguimiento del comportamiento de tamaño morfométrico de glaciares y la relación de clima regional en la latitud 8 °-16 ° S, Perú. *Aqua-LAC*, 14(1). DOI: 10.29104/phi-aqualac/2022-v14-1-04
- Tacsi, A., Condom, T., Garcia, J., Cochachin, A., & Mejia, A. (2021). Modelización hidro-glaciológico actual y futura de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú. *Aqua-LAC*, 13(1), 108-127. DOI: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-08
- UGRH & ANA, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Inventario de glaciares de la Cordillera Blanca*. Huaraz-Ancash, Perú: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Autoridad Nacional del Agua.
- UGRH-E, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Electroperú. (1993). *Estudio geológico en la sub-cuenca del río Yanayacu*. Huaraz-Ancash, Perú: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-Electroperú.

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-02

Artículos

## **Estimación de volumen de una presa usando percepción remota y Machine Learning**

### **Estimation of dam volume using remote sensing and Machine Learning**

Fernando Flores-Escobar<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6572-1058>

Enrique Palacios-Vélez<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1716-9377>

Adolfo Antenor Exebio-García<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3280-0278>

Demetrio Salvador Fernández-Reynoso<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1734-3152>

Ramón Valdivia-Alcalá<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-3169>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados, Estado de México, México, fernando231082@gmail.com

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Estado de México, México, epalaciospave80@gmail.com

<sup>3</sup>Colegio de Postgraduados, Estado de México, México, adolfoantenor@hotmail.com

<sup>4</sup>Colegio de Postgraduados, Estado de México, México, demetrio@colpos.mx

<sup>5</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México,  
ramvaldi@gmail.com

Autor para correspondencia: Fernando Flores-Escobar,  
fernando231082@gmail.com

## Resumen

En México, donde el sector más importante de consumo de agua es la agricultura y debido a que es cada vez la mayor la demanda de alimentos, es necesario llevar un adecuado balance entre la producción agrícola y el consumo de agua. En este trabajo, con la ayuda de imágenes Sentinel, se generaron modelos de Machine Learning para estimar la superficie y el volumen de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) del Distrito de Riego 030, que recibe aguas residuales, lo que provocó la proliferación de lirio acuático. Existen índices de agua como NDWI,  $NDWI_{Mcfeeter}$ ,  $NDWI_{Gao}$ ,  $NDWI_{Xu}$ ,  $AWEI_{non-shadow}$ ,  $AWEI_{shadow}$  e ICEDEX, que permiten la discriminación de los espejos de agua mediante el uso de imágenes satelitales. Sin embargo, en este caso, el uso de los índices confunde el lirio con la vegetación natural. El entrenamiento se realizó con los valores de los índices mencionados anteriormente y de las capas RGB, NIR y SWIR a nivel pixel, y los resultados obtenidos de la precisión fueron los siguientes: modelo de discriminación lineal, 98.1%; árboles de decisión, 99.2 %; y regresión logística, 98.5 %; con estos modelos fue posible estimar el área del espejo de agua de la presa. Con la gráfica de áreas capacidades de la presa se generó una función cuadrática con una  $r^2$  de 0.9988, en la que el volumen está en función de área y se estimó el

volumen de la presa donde la diferencia promedio es de un 8.5 % con el modelo de discriminación lineal.

**Palabras clave:** Machine Learning, lirio acuático, estimación de volumen presa, índices de agua, imagen Sentinel 2.

## Abstract

In Mexico, where the most significant water consumption sector is agriculture, and due to the increasing demand for food, it is necessary to maintain a proper balance between agricultural production and water consumption. In this study, with the assistance of Sentinel 2 images, Machine Learning models were developed to estimate the surface area and volume of the Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) dam in Irrigation District 030, which receives wastewater, leading to the proliferation of aquatic lily. There are water indices such as NDWI,  $NDWI_{Mcfeeter}$ ,  $NDWI_{Gao}$ ,  $NDWI_{Xu}$ ,  $AWEI_{non-shadow}$ ,  $AWEI_{shadow}$ , and ICEDEX, which enable the discrimination of water bodies through the use of satellite images. However, in this case, the use of these indices results in confusion between the lilies and natural vegetation. The training was conducted using the values of the aforementioned indices and the RGB, NIR, and SWIR layers at the pixel level, and the accuracy results obtained were as follows: Linear discrimination model at 98.1 %, decision trees at 99.2 %, and logistic regression at 98.5 %. With these models, it was possible to estimate the surface area of the dam's water body. Using the graph of the dam's capacity areas, a quadratic function with an R-squared value of 0.9988 was generated, where volume is a function of area, and the dam's volume was estimated, with an average difference of 8.5 % compared to the linear discrimination model.

**Keywords:** Machine Learning, aquatic lily, dam volume estimation, water indices, Sentinel 2 image.

Recibido: 19/12/2023

Aceptado: 26/09/2024

Publicado *ahead of print*: 08/10/2024

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

El módulo monitor de presas presenta el volumen almacenado al día de 210 presas del país; cuenta con históricos desde el año 2007.

Existen presas que reciben aportaciones de aguas residuales, lo que implica que el agua sea de mala calidad, con alta concentración de contaminantes, como es el caso de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), ubicada en el Distrito de Riego 030, Puebla. El agua de la presa Valsequillo está clasificada como C3S1, agua altamente salina con bajo contenido de sodio; con estas propiedades, el agua debe tener uso restringido en cultivos poco tolerantes a la salinidad y en suelos con drenaje deficiente (Bonilla, Silva, Cabrera, & Sánchez, 2013); tener alto grado de contaminación ha implicado que la escala de medición de la presa se borre, motivo por el cual no es posible medir de manera precisa el volumen almacenado de agua en la presa; así, se busca una alternativa confiable para cuantificar los volúmenes de agua en la presa usando imágenes satelitales.

En el presente trabajo se propone desarrollar un modelo de clasificación supervisada para cuerpos de agua con lirio, mediante el uso de imágenes captadas por el satélite Sentinel 2 y algoritmos de Machine Learning (M.L.), y de esa forma poder realizar una estimación del volumen de la presa Valsequillo del Distrito de Riego 030. Esto es importante dado que permite ver la disponibilidad del recurso agua en las fuentes de abastecimiento superficiales para planificar adecuadamente los riegos agrícolas.

## Antecedentes

La agricultura en México y en el mundo consume aproximadamente el 70% del agua dulce (Conagua, 2018), y se registra cada vez más una fuerte competencia por el uso con el consumo urbano e industrial.

Las presas regulan el flujo del agua en los ríos y pueden tener uno o varios usos a la vez; proporcionan energía hidroeléctrica, además de volúmenes de agua para el riego y el abastecimiento público, o para controlar avenidas. Dentro del uso agrícola es importante conocer la disponibilidad de agua para la planificación adecuada del riego.

México cuenta con el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), un instrumento de gestión de la información estratégica de los recursos hídricos en México a cargo de la Gerencia de Planificación Hídrica de la Dirección General de la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

El SINA integra, analiza y brinda información estadística y geográfica del sector hídrico proveniente de diversas áreas de la Conagua y de otras instituciones para apoyar la toma de decisiones en el diseño, implementación y seguimiento de políticas públicas para lograr la

sustentabilidad y seguridad hídrica en las cuencas y acuíferos del país (Conagua, 2013).

La percepción remota o teledetección es una herramienta que permite el estudio de la cubierta terrestre desde las superficies continentales hasta los cuerpos de agua como mares, ríos, etcétera.

La extracción de información útil a partir de imágenes de satélite, por medio de la clasificación, es uno de los problemas técnicos más importantes de la teledetección. El objetivo de la teledetección es la determinación de las características y de los fenómenos que tienen lugar en la superficie de la Tierra a través de su firma espectral, los estudios de teledetección, las variaciones temporales, espaciales y espectrales de la superficie del planeta (Chuvieco, 2002).

Existen índices de vegetación de gran importancia que utilizan la banda roja, el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (SWIR), como son el índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) (Rouse, Hass, Deering, & Schell, 1974); el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), y el índice de estrés de humedad (MSI), que ayudan en la discriminación de vegetación, pero también ayudan a discriminar los cuerpos de agua en imágenes satelitales. Sin embargo, en los estudios de teledetección, la mayoría de los algoritmos de detección de cuerpos de agua se basan solo en los índices de agua.

Estos índices se han usado para la discriminación de cuerpos de agua. McFeeters (1996) diseñó un índice de agua popular: el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) para el mapeo de agua a partir de imágenes satelitales. Se ha utilizado el infrarrojo cercano (NIR) y la banda verde del Landsat Thematic Mapper (TM) para representar las características del agua. Xu (2006) modificó el NDWI reemplazando la

banda NIR por infrarrojos de onda corta (SWIR) y lo denominó índice de agua de diferencia normalizada modificada (MNDWI). MNDWI redujo parcialmente la tasa de error generada por el suelo, la vegetación y las áreas urbanizadas. Feyisa, Meilby, Fensholt y Proud (2014) presentaron el índice de extracción de agua automatizada (AWEI) para atender la clasificación errónea de la sombra como agua mediante el uso de bandas multiespectrales. Se creó un nuevo índice de agua con análisis discriminante lineal de Fisher (Fisher, Flood, & Danaher, 2016) revisado utilizando cinco bandas de reflectancia superficial (SR) de Landsat. También proporcionó una comparación exhaustiva de los índices de agua para las imágenes de Landsat.

Fisher *et al.* (2016) evaluaron la precisión de siete métodos de índice de agua para clasificar el agua en imágenes Landsat TM/ETM+/OLI de resolución de 30 m del este de Australia. Estos índices fueron el índice de extracción de agua automatizado para imágenes con sombras ( $AWEI_{shadow}$ ) y sin sombras ( $AWEI_{non-shadow}$ ); el índice de humedad *tasseled cap* ( $TCW_{Crist}$ ); dos variaciones del índice de agua de diferencia normalizada ( $NDWI_{McFeeters}$  y  $NDWI_{Xu}$ ); un índice de agua creado mediante el análisis de variables canónicas a partir de datos de la parte superior de la atmósfera  $WI_{2006}$ , y un nuevo índice de agua creado con análisis discriminante lineal a partir de datos procesados hasta la reflectancia de la superficie  $WI_{2015}$ . En general, el  $WI_{2015}$ ,  $WI_{2006}$  y  $WEI_{shadow}$  se desempeñaron mejor; todos los índices lograron precisiones generales de 95 a 99 % para píxeles puros, y de 73 a 75 % para píxeles mixtos.

Otro índice es el ICEDEX (Índice del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) de España. Está destinado al mapeo de aguas continentales, en que se busca reducir la influencia de

vegetación y la presencia de material en suspensión (sedimentos, algas) de acuerdo con Ariza, García, Rojas y Ramírez (2013).

Chul, Hun y Yeal (2015) proponen un nuevo método de clasificación de masas de agua utilizando la reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) y los índices de agua (WI) del sensor Landsat 8 Operational Land Imager (OLI), y sus correspondientes clasificadores de bosques aleatorios potenciados (BRF); demostraron que el rendimiento de la combinación propuesta de dos clasificadores BRF muestra resultados sólidos de clasificación de cuerpos de agua, independientemente de la topología, las propiedades del río y el entorno de fondo.

La teledetección y la inteligencia artificial en los últimos años están desarrollando técnicas para el procesamiento de imágenes satelitales y su interpretación en diferentes ámbitos, como el estudio de coberturas, la agricultura de precisión y problemas ambientales. Esto también es posible con el uso de tecnologías y procesadores de algoritmos de Machine Learning (ML) con eficiencia computacional y el acceso a datos accesibles de plataformas satelitales como Landsat y Sentinel para fines de investigación (Chucos & Vega, 2022).

Los índices de agua de manera individual discriminan de forma muy exacta los cuerpos de agua. Sin embargo, cuando existen aguas residuales que permiten la proliferación de lirio acuático u otro tipo de vegetación, dicha discriminación suele confundirse con la vegetación natural, es por eso que para esta investigación se utilizó el entrenamiento algoritmos de Machine Learning mediante el uso de la inteligencia artificial para disminuir dicho error.

La automatización de clasificación de cuerpos de agua mediante el uso de imágenes para identificar las fuentes de abastecimiento (presas)

de los distritos de riego (DR) es un apoyo en la operación del DR, que permitirá tener un estimado de la disponibilidad del recurso hídrico.

## Materiales y métodos

El Distrito de Riego 030, Valsequillo, se ubica en el centro-sureste del estado de Puebla (Figura 1), entre los paralelos  $18^{\circ} 28' 37''$  y  $18^{\circ} 53' 49''$  latitud norte y  $97^{\circ} 27' 19''$  y  $97^{\circ} 55' 57''$  longitud oeste.

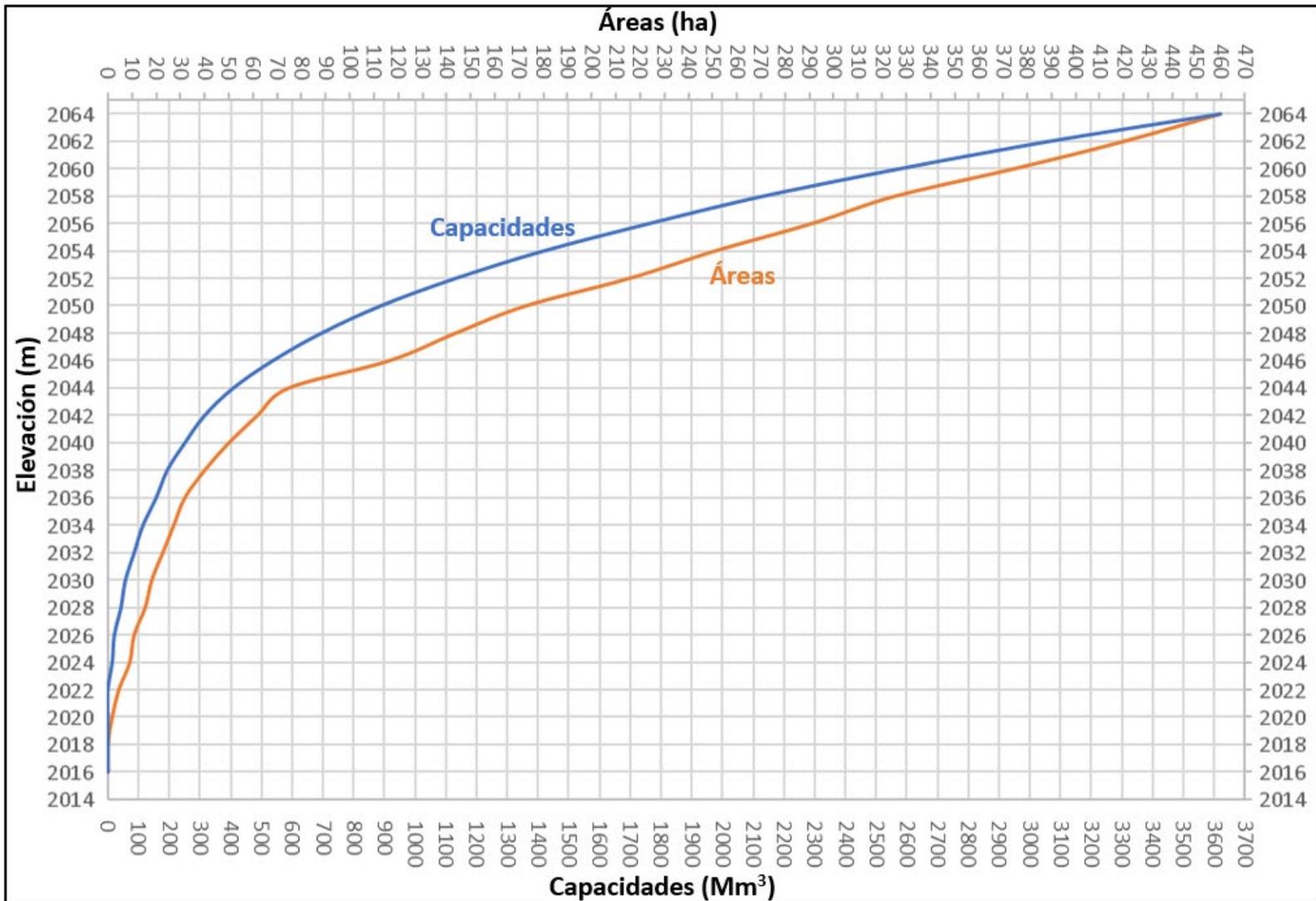


**Figura 1.** Ubicación del Distrito de Riego 030 y presa Valsequillo.

La presa de almacenamiento Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) está situada en las coordenadas 18° 54' 45.23" latitud norte y 98° 06' 30.08" longitud oeste de Greenwich, sobre el río Atoyac (Figura 1); se localiza en el municipio de Puebla, Puebla. La construcción fue terminada el 13 de diciembre de 1946 para almacenar los escurrimientos naturales del río Atoyac. El área de la cuenca es de 3 954 km<sup>2</sup>, con un escurrimiento medio anual de 296.448 Millones de m<sup>3</sup>.

La presa de almacenamiento es de tipo mixta, con una altura de 83 m; tiene una longitud de corona de 425 m, construida con materiales de tierra compacta y roca. Su vaso tiene una capacidad total de 304.246 Millones de m<sup>3</sup>, una capacidad útil 294.502 Millones de m<sup>3</sup>, capacidad de azolves de 9.744 Millones de m<sup>3</sup>. La obra de toma es de tipo torre, con una carga máxima de 29.31 m, un gasto máximo de 50 m<sup>3</sup>/s y una superficie regable de 25.942 ha. Tiene un vertedor tipo Creager con longitud de cresta de 170 m y una capacidad máxima de descarga de 2 000 m<sup>3</sup>/s.

La última información proporcionada por el distrito de riego de batimetría de la presa Valsequillo es del 2008, de un levantamiento topobatimétrico que se presenta en la Figura 2; la capacidad de la presa en la actualidad ha disminuido debido a los azolves.



**Figura 2.** Información topobatimétrica de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo) en 2008.

Para el presente trabajo se descargaron imágenes del Sentinel 2 que estuvieran libres de nubosidad dentro del área donde se realizó el trabajo. Actualmente la escala de medición de la presa se ha borrado debido a la mala calidad del agua, por lo que se utilizaron imágenes del

2015-2016, para poder comparar los datos obtenidos del modelo con los datos reportados por la Comisión Nacional del Agua.

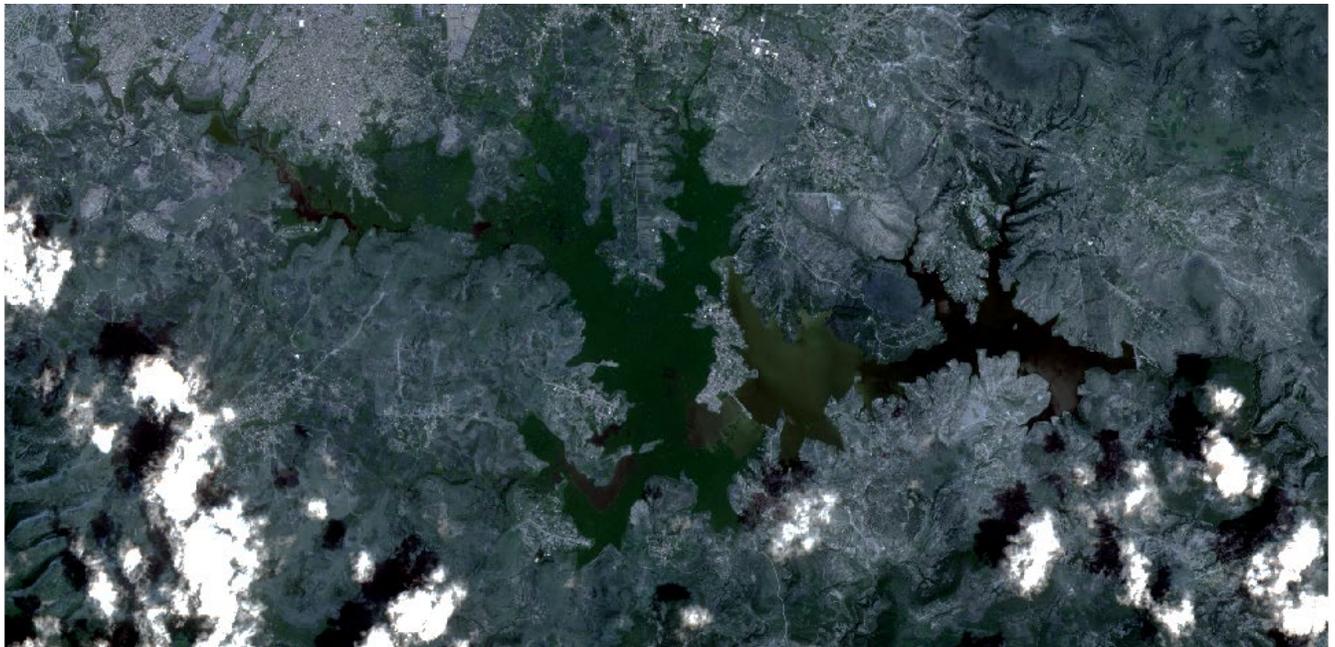
Fechas de las imágenes Sentinel obtenidas:

- 06/08/2015
- 05/10/2015
- 04/12/2015
- 03/01/2016
- 28/11/2016
- 28/12/2016

Para las imágenes descargadas se hizo corrección atmosférica y transformación de datos utilizando el método DOS (Dark Object Substraction) con la ayuda del *software* Qgis y el complemento Semi-Automatic Classification Plugin v6 (SCP6), y se recortó el área de trabajo (Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8).



**Figura 3.** Imagen Sentinel 2 del área de estudio de fecha 06/08/2015.



**Figura 4.** Imagen Sentinel 2 del área de estudio de fecha 05/10/2015.



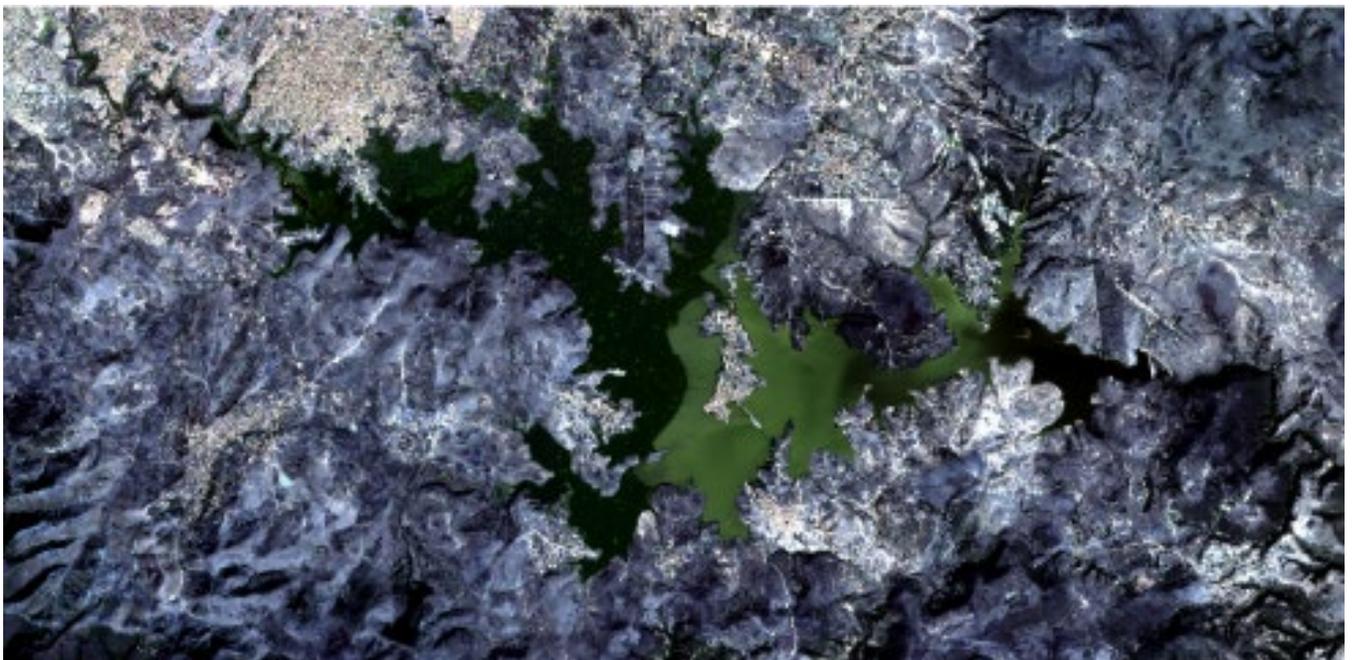
**Figura 5.** Imagen Sentinel 2 del área de estudio de fecha 04/12/2015.



**Figura 6.** Imagen Sentinel 2 del área de estudio de fecha 03/01/2016.

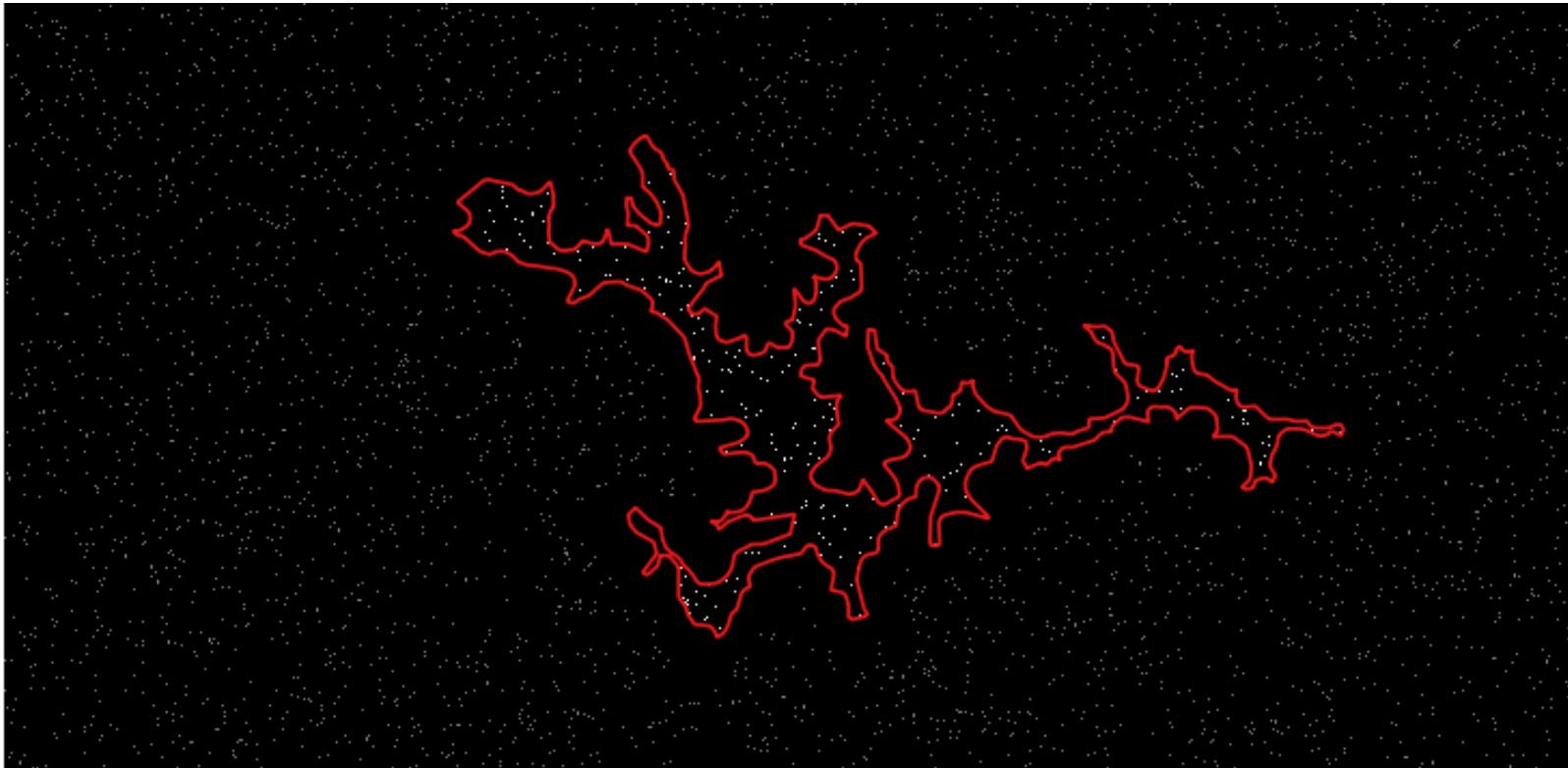


**Figura 7.** Imagen Sentinel 2 del área de estudio de fecha 28/11/2016.



**Figura 8.** Imagen Sentinel 2 del área de estudio de fecha 28/12/2016.

Para el entrenamiento de los modelos de ML se realizó la extracción de características de las imágenes; se dividieron en dos clases: 1) clase no agua y 2) clase agua (Figura 9).



**Figura 9.** Píxeles muestra para el modelo de clasificación del área de la presa.

La extracción de características se realizó a nivel píxel para cada una de las seis imágenes, y se utilizaron los valores de las bandas y los índices de agua encontrados en la literatura para entrenar los modelos de Machine Learning. Para la extracción de características se programó un script en Matlab y poder trabajar con los datos de los píxeles seleccionados como muestras.

Se extrajeron para cada clase los valores por pixel de las siguientes bandas:

- Banda roja (RED).
- Banda verde (GREEN).
- Banda azul (BLUE).
- Banda infrarroja cercana (NIR)
- Banda infrarroja de onda corta 1 (SWIR-1)
- Banda infrarroja de onda corta 2 (SWIR-2)

Se extrajeron los valores por pixel de los siguientes índices de agua para cada clase:

- Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

- Índice de agua de diferencia normalizada ( $NDWI_{McFeeter}$ ) (McFeeters, 1996):

$$NDWI_{Mcfeeter} = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR} \quad (2)$$

- Índice de agua de diferencia normalizada ( $NDWI_{Gao}$ ) (Gao, 1996):

$$NDWI_{Gao} = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (3)$$

- Índice de agua de diferencia normalizada modificada (MNDWI<sub>Xu</sub>) (Xu, 2006):

$$MNDWI_{Xu} = \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1} \quad (4)$$

- Índice de agua de diferencia normalizada modificada (MNDWI) (Xu, 2006):

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR2}{GREEN + SWIR2} \quad (5)$$

- Índice de extracción de agua automatizada (AWEI<sub>non-shadow</sub>) (Fisher *et al.*, 2016):

$$AWEI_{non-shadow} = 4 \times (GREEN - SWIR1) - 0.25 \times NIR - 2.75 \times SWIR1 \quad (6)$$

- Índice de extracción de agua automatizada (AWEI<sub>shadow</sub>) (Fisher *et al.*, 2016):

$$AWEI_{shadow} = BLUE + 2.5 \times GREEN - 1.5 \times (NIR - SWIR1) - 0.25 \times SWIR2 \quad (7)$$

- Índice de agua ICEDEX (Ariza *et al.*, 2013):

$$ICEDEX = \frac{NIR}{RED} - \frac{NIR}{SWIR1} \quad (8)$$

Para entrenar y validar los modelos se utilizó APP Classification Learner de Matlab, con 14 variables, para cada imagen.

Para el entrenamiento del modelo se utilizaron tres métodos:

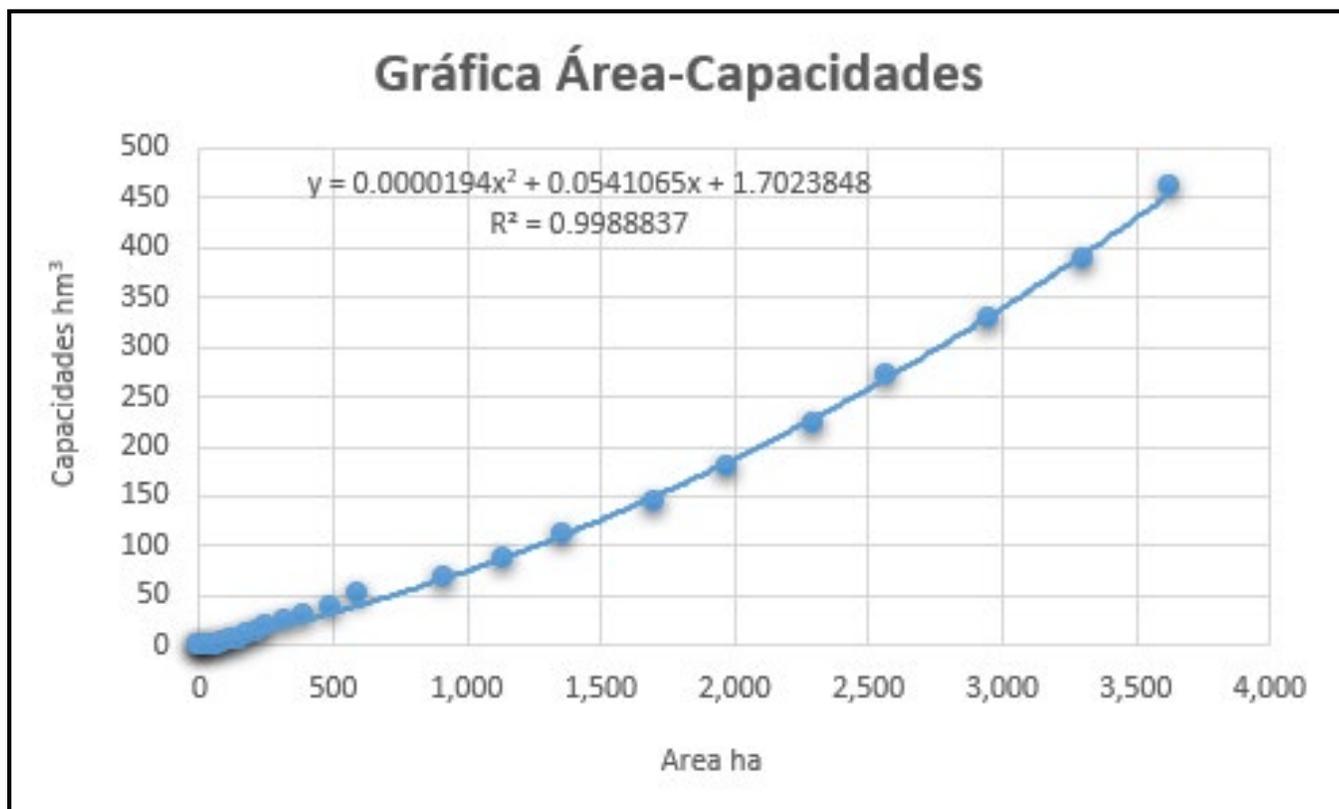
- Discriminación lineal
- Árboles de decisión
- Regresión logística

Para la validación se eligió la opción de validación cruzada con cinco conjuntos de datos para validación.

Con los modelos generados se estimaron las superficies del espejo de agua de la presa para las fechas de las imágenes.

Se calcularon los índices de vegetación de manera individual y se hizo una comparación de los resultados obtenidos mediante los modelos de ML

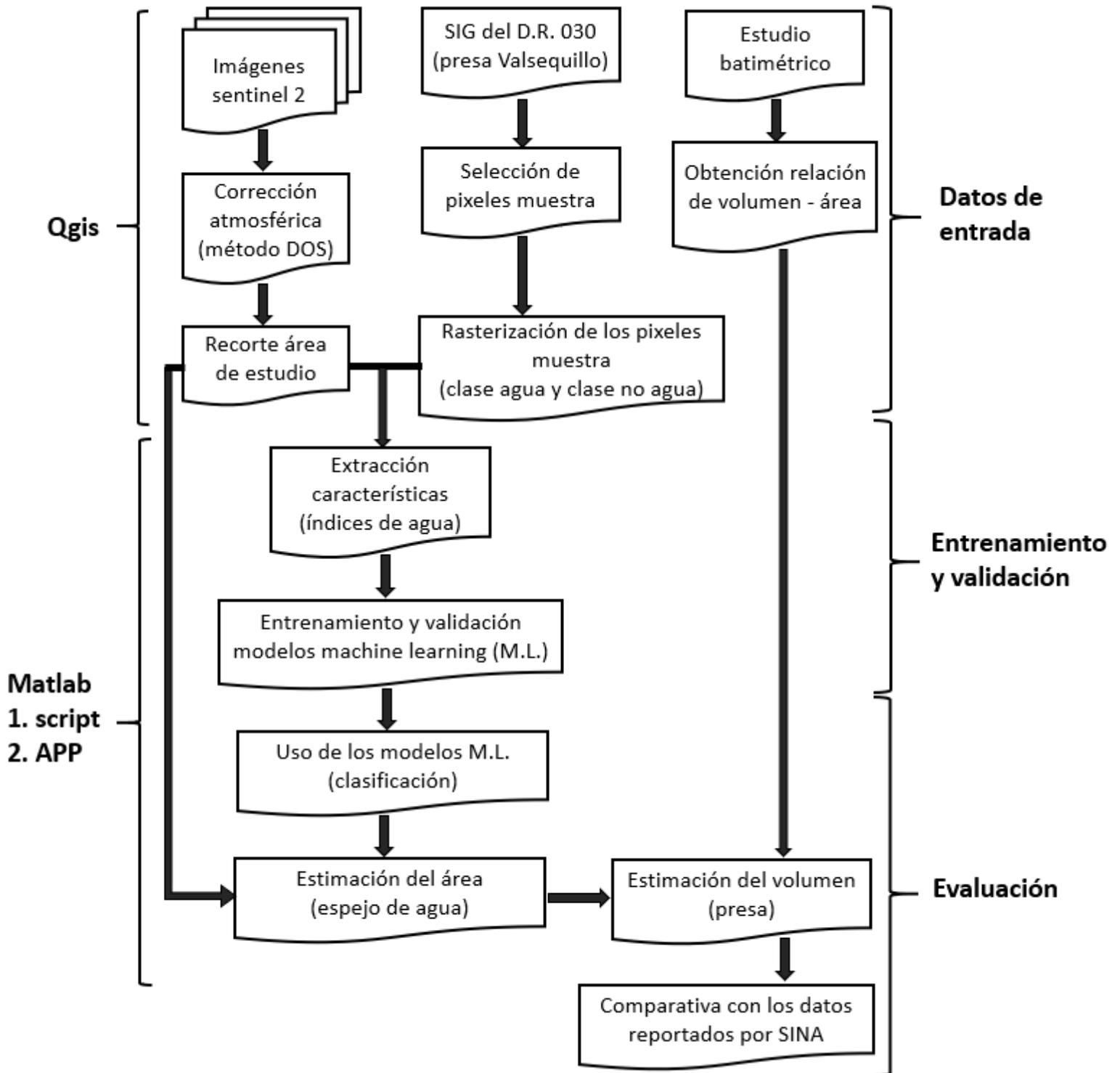
Se graficaron los datos de las áreas y las capacidades obtenidos de la Figura 2, y se obtuvo una función cuadrática con una  $r^2$  de 0.9988, como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Gráfica área, capacidades de la presa Valsequillo.

Con la función obtenida y el área estimada mediante los modelos de ML se estimó el volumen almacenado para las fechas de las imágenes seleccionadas y se realizó un comparativo con las publicadas por la Comisión Nacional del Agua.

En resumen, se presenta un esquema de la metodología empleada en la Figura 11.



**Figura 11.** Metodología empleada para la estimación de volumen de la presa Valsequillo del D.R. 030.

Esta metodología de estimación de volumen mediante el uso de modelos ML e imágenes satelitales se aplicó también para la presa Solís ubicada en el cauce del río Lerma en el municipio de Acámbaro, Guanajuato, perteneciente a la infraestructura del Distrito de Riego 011 y con una capacidad útil de almacenamiento de 728 Millones de m<sup>3</sup>, con la finalidad de tener otro ejemplo para su validación. Para la estimación se usaron imágenes Sentinel 2 de tres fechas diferentes (Figura 12):

- 15/12/2021
- 30/03/2022
- 15/12/2022



Imagen 15/12/2021



Imagen 30/03/2022

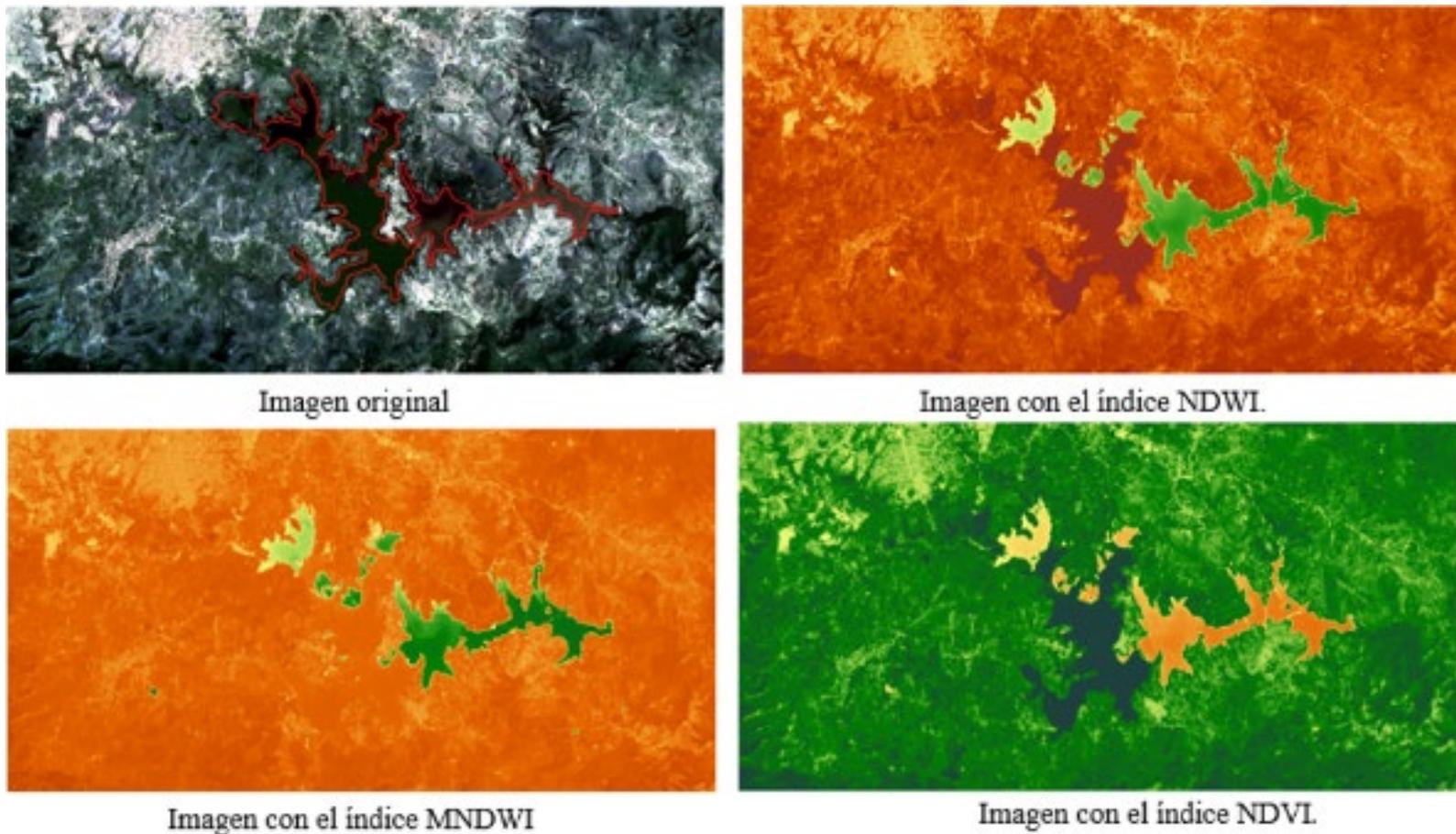


Imagen 15/12/2022

**Figura 12.** Imagen Sentinel 2 del área de la presa Solís.

## Resultados

Se calcularon los índices de NDWI, MNDWI y NDVI de manera individual para discriminar los cuerpos de agua; sin embargo, en este caso, con aguas residuales y lirio acuático, la discriminación se confunde con la vegetación natural (Figura 13).

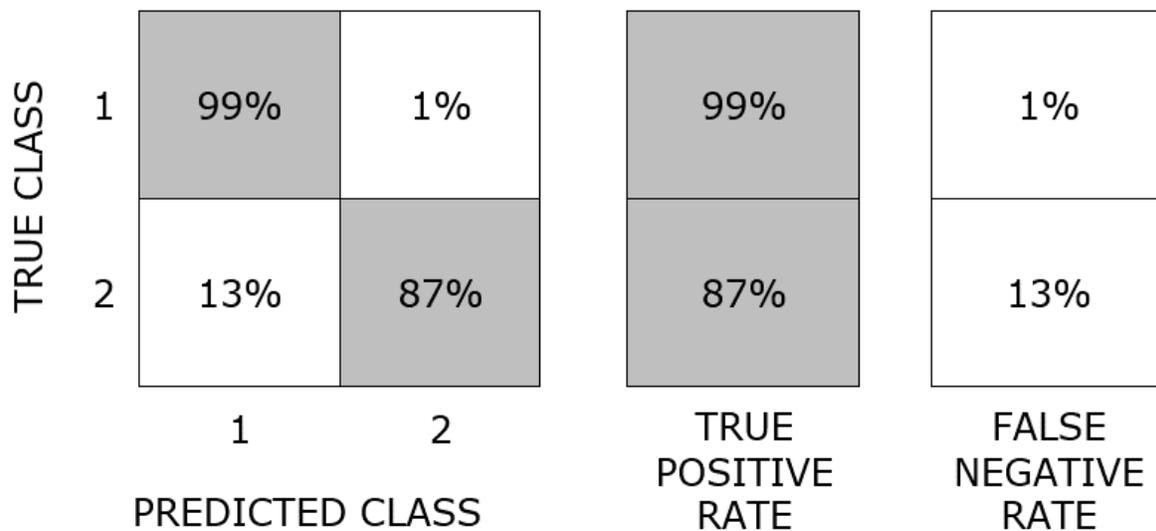


**Figura 13.** Índices calculados para discriminar la presa Valsequillo.

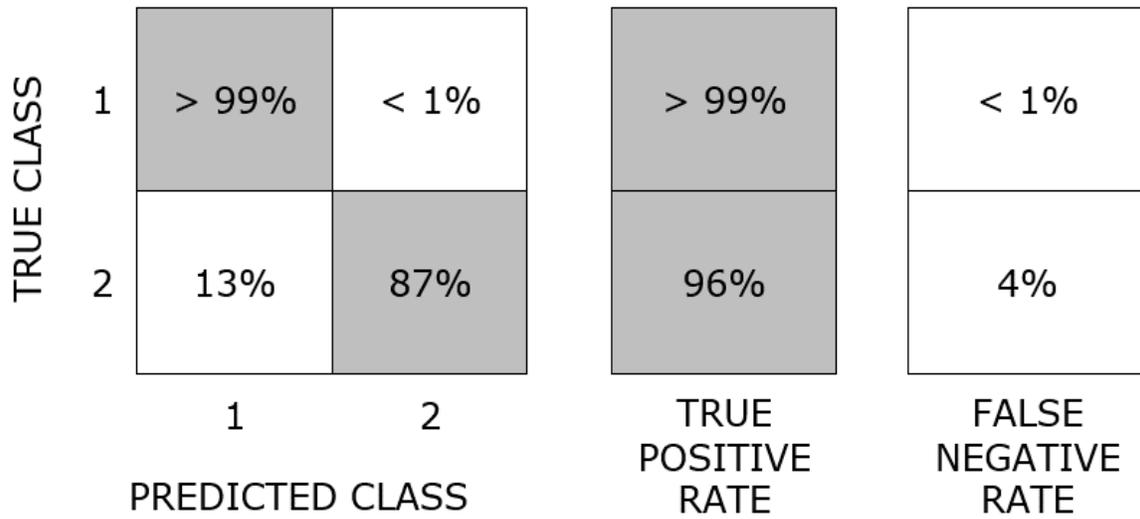
De los resultados obtenidos de los modelos generados mediante Machine Learning para la discriminar cuerpos de agua, el modelo que mejor precisión tuvo fue el de árboles de decisión con un 99.2 %, como se muestra en la Tabla 1 y en la Figura 14, Figura 15, y Figura 16.

**Tabla 1.** Precisión de los modelos generados con la APP Classification Learner de Matlab (presa Valsequillo).

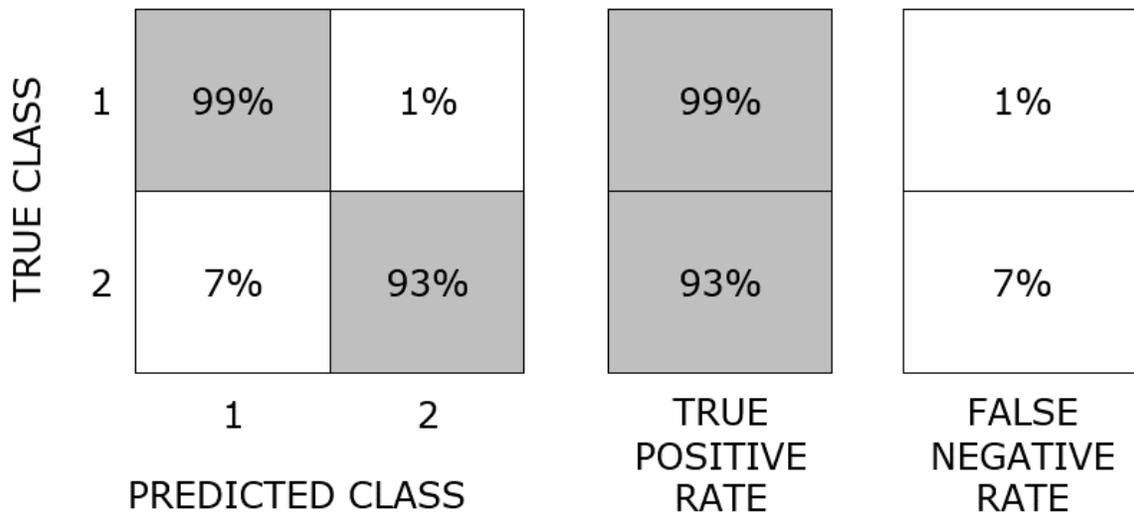
Modelo	Precisión (%)
Discriminación lineal (DL)	98.1
Árboles de decisión (AD)	99.2
Regresión logística (RL)	98.5



**Figura 14.** Gráfica de *true positive-false negative* de discriminación lineal.



**Figura 15.** Gráfica de *true positive-false negative* de árboles de decisión.

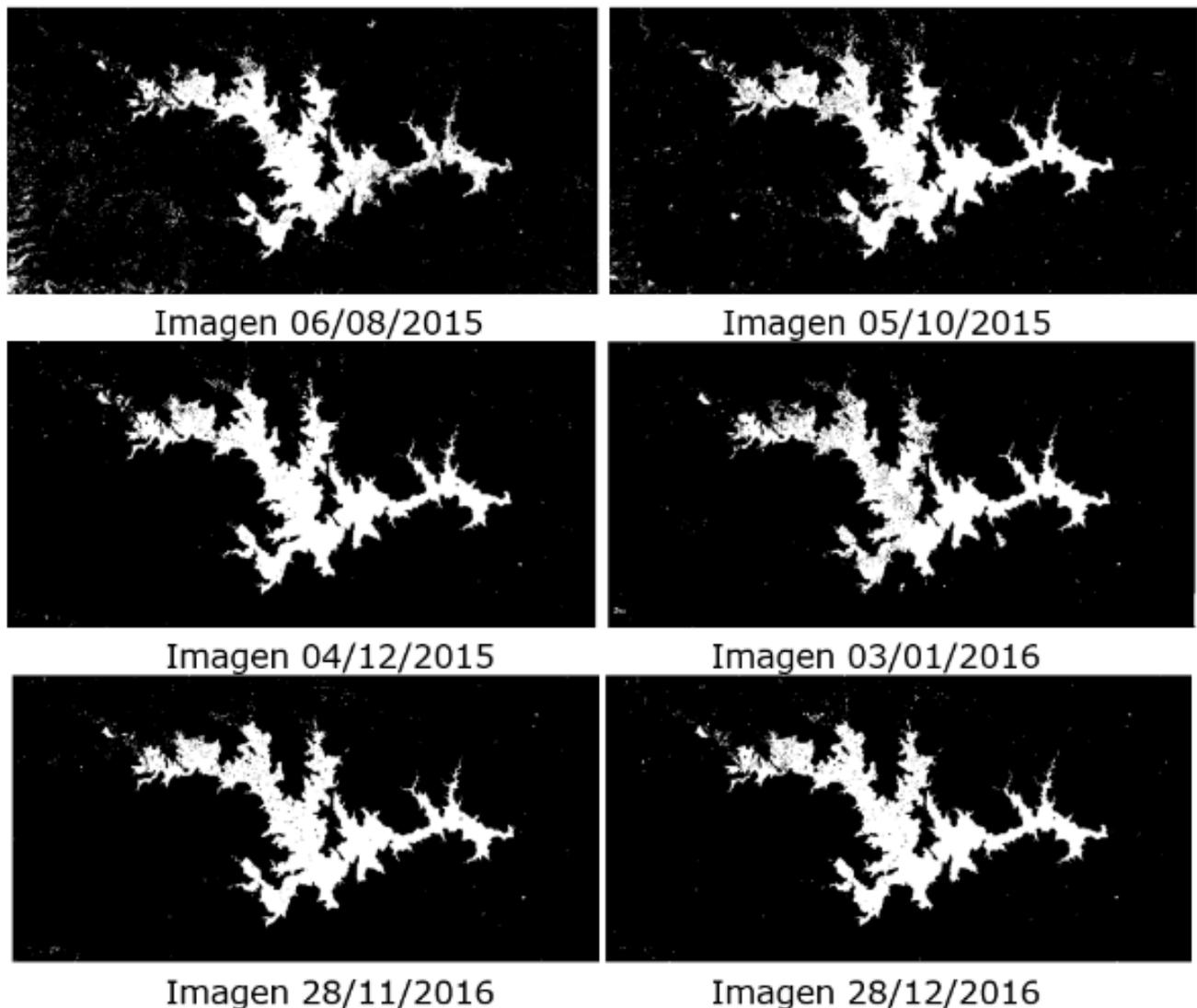


**Figura 16.** Gráfica de *true positive-false negative* de regresión logística.

Los resultados son parecidos a los encontrados en la literatura, con la diferencia de que no incluían vegetación en los cuerpos de agua como en este caso la presa Valsequillo, que presenta lirio acuático. Y que,

utilizando los mismos índices de manera individual, en este caso en particular la discriminación no es buena.

Se utilizaron las imágenes de la presa Valsequillo para implementar el modelo de árboles de decisión para realizar una clasificación y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 17.



**Figura 17.** Clasificación de imágenes con el modelo obtenido para la presa Valsequillo (árboles de decisión).

Con los datos obtenidos de los modelos de clasificación supervisada, el tamaño de pixel (10 x 10 m) y el uso de un *script*, se estimó el área de la superficie libre del agua (Tabla 2). Con la ecuación obtenida a partir de la gráfica de área-capacidades (Figura 10) y el área estimada se estimó el volumen de la presa para cada imagen (Tabla 3):

$$Volumen = 0.0000194 * Area^2 + 0.0541065 * Area + 1.7023848$$

Los datos son área estimada mediante ML en ha y volumen en hm<sup>3</sup>.

**Tabla 2.** Área estimada de la presa Valsequillo con los modelos Machine Learning.

Imagen	Área estimada (DL) ha	Área estimada (AD) ha	Área estimada (RL) ha
06/08/2015	2 416.1	2 589.9	2 830.6
05/10/2015	2 501.9	2 773.2	2 684.0
04/12/2015	2 541.8	2 674.4	2 628.2
28/11/2016	2 492.1	2 577.8	2 593.5
28/12/2016	2 270.7	2 557.1	2 511.4

**Tabla 3.** Volumen estimado de la presa Valsequillo con la ecuación de área capacidades.

Imagen	Vol. estimado (DL) hm <sup>3</sup>	Vol. estimado (AD) hm <sup>3</sup>	Vol. estimado (RL) hm <sup>3</sup>
06/08/2015	245.68	265.65	310.29
05/10/2015	258.50	300.94	286.68
04/12/2015	264.57	285.15	277.90
28/11/2016	257.02	270.09	272.51
28/12/2016	224.58	266.91	259.94

Se aplicó el modelo para realizar una clasificación y estimar el volumen almacenado en la presa Solís, donde se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 18 y Tabla 4, el volumen de la presa Solís de acuerdo con su estudio batimétrico se calculó con la siguiente ecuación, con una  $r^2$  de 0.9995:

$$Volumen = 0.0000197 * Area^2 + 0.0120685 * Area + 4.3967922$$

Los datos son área estimada mediante ML en ha y volumen en hm<sup>3</sup>.



Imagen 15/12/2021

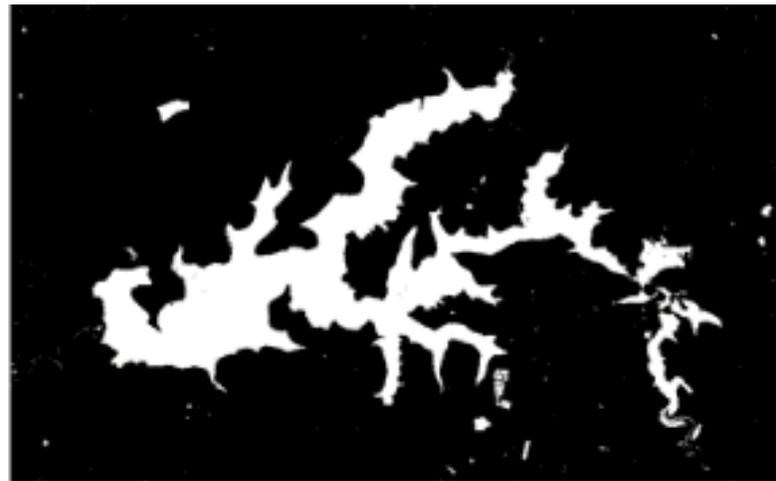


Imagen 30/03/2022



Imagen 15/12/2022

**Figura 18.** Clasificación de imágenes con el modelo obtenido para la presa Solís.

**Tabla 4.** Volumen estimado de la presa Solís por algoritmo ML y el reportado en el Sistema Nacional de Información del Agua por la Comisión Nacional del Agua.

Imagen	Área estimada ha	Volumen estimado hm <sup>3</sup>	Volumen reportado hm <sup>3</sup>	Diferencia %
06/08/2015	5 971.21	778.87	809.00	-3.72
05/10/2015	5 217.60	603.67	653.06	-7.42
28/12/2016	5 081.64	574.44	653.00	-12.05

## Discusión

Se puede observar que la superficie de agua de la presa se discrimina con mayor exactitud con los modelos generados de Machine Learning con precisiones mayores al 99 % (Figura 17), que usando individualmente los índices de agua y el NDVI (Figura 13); esto, debido a la mala calidad del agua, donde el lirio en la presa se confunde y clasifica como vegetación.

En los volúmenes estimados para la presa Valsequillo comparados con las estadísticas reportadas de la Conagua en la página del SINA (Tabla 5) se observa que la diferencias respecto a la información reportada oficial tiene una variación promedio en la imágenes analizadas del 16.12 % para el área estimada mediante discriminación lineal; 6.89 % para el área estimada mediante árboles de decisión, y el 10.99 % para el área estimada mediante regresión logística, lo que indica que el modelo de árboles de decisión es con el que se tiene una mejor estimación del volumen almacenado en la presa. Para los volúmenes estimados de la presa Solís, la variación fue de un 7.13 % en promedio por debajo del reportado en el SINA; estas diferencias pueden ser por el lirio que se

encuentra en las orillas del espejo de agua, por errores reportados en la medición del volumen almacenado en la presa, pero principalmente por el tamaño de pixel, dado que, como se puede observar, la presa Solís no cuenta con problemas de lirio acuático y el error es muy parecido al de la presa Valsequillo. Para mejores resultados se recomienda realizar el análisis con imágenes de mayor resolución espacial, y mediciones en campo con un estudio batimétrico actualizado y nueva escala.

**Tabla 5.** Volumen almacenado de la presa Valsequillo reportado en el Sistema Nacional de Información del Agua por la Comisión Nacional del Agua.

Imagen	Vol. reportado hm <sup>3</sup>	Diferencia (DL) (%)	Diferencia (AD) (%)	Diferencia (RL) (%)
06/08/2015	271.66	-9.56	-2.21	14.22
05/10/2015	306.93	-15.78	-1.95	-6.60
04/12/2015	306.39	-13.65	-6.93	-9.30
28/11/2016	270.09	-15.53	-11.23	-10.44
28/12/2016	266.91	-26.06	-12.12	-14.41

El modelo que mejor precisión tuvo para la clasificación supervisada de cuerpos de agua fue el de árboles de decisión, con una precisión del 99.2 %, por lo que podemos definir que las variaciones de las áreas y los volúmenes de agua estimados se deben principalmente al tamaño de pixel, que en este caso en particular es de 10 x 10 m.

Estos resultados podrían implementarse como una alternativa de medición en los procesos de operación para todo tipo de presa. Como se observó, los resultados obtenidos en la presa Valsequillo son parecidos a

los obtenidos en la presa Solís. Estos modelos que usan algoritmos ML, imágenes satélites e incluso podrían usar las imágenes de drones, también pueden ser utilizados para el seguimiento geoespacial y multitemporal de las variaciones del área de otros cuerpos de agua, como son lagos o lagunas que cuenten con algún tipo de vegetación, como el lirio acuático, ya que son de gran importancia para los ecosistemas y el desarrollo socioeconómico local y regional, pues permiten, entre otras cosas: equilibrio ecológico; protección de las sequías e inundaciones; hábitat único para muchas plantas y animales; agricultura; pesca, e industria, incluso para realizar estudios donde se requiera información de años pasados.

Las imágenes satelitales proporcionan datos visuales actualizados y detallados sobre la superficie del agua en las presas. Estas imágenes, combinadas con algoritmos de Machine Learning, pueden ser procesadas para calcular el área superficial del embalse y, con información topográfica y/o batimétrica, estimar de manera más precisa el volumen de agua almacenado. Como alternativa al estudio batimétrico se pueden realizar levantamientos topográficos LIDAR (Light Detection and Ranging) mediante el uso de drones.

La precisión de estas estimaciones será con base en la resolución de las imágenes y el estudio de batimetría actualizado.

Las imágenes satelitales también proporcionan información valiosa sobre los cambios en la cuenca hidrográfica, como la deforestación o urbanización, que pueden afectar el volumen de agua que llega a la presa. Machine Learning puede integrar estos datos en modelos de simulación para prever los impactos a largo plazo de estas alteraciones, ayudando a los operadores a planificar de manera más eficiente la gestión del recurso hídrico.

## Conclusiones

La identificación de los cuerpos de agua es muy importante para diversas estimaciones científicas, así como para la resolución de problemas sociales. Se han desarrollado muchos métodos y se están explorando nuevos enfoques, sin embargo, existen casos donde la resolución espectral y espacial son determinantes para la exactitud del área de cuerpos de agua identificados. En el presente trabajo se obtuvieron buenos resultados en el entrenamiento de los modelos de Machine Learning, con precisiones del 98.1 % para el modelo de discriminación lineal, 99.2 % para el de árboles de decisión y del 98.5 % para el de regresión logística, para una clasificación supervisada de cuerpos de agua con lirio acuático. El error fue mayor para obtener estimaciones en el volumen de agua en una presa, donde obtuvimos variaciones en promedio del 16.12, 6.89 y 10.99 %, respectivamente, para los modelos utilizados; estos resultados podrían ser más precisos si se realizaran con imágenes de mayor resolución espacial y con mediciones actualizadas en la presa. Es recomendable actualizar el estudio batimétrico para obtener datos más apegados a la situación actual de la presa.

El Machine Learning ha logrado con éxito plantear modelos en varias ramas, incluyendo el de los recursos hídricos que ayudan en la optimización de recursos y procesos; estos modelos, basados en ML, representan un ahorro sustancial en tiempo y medios económicos, de tal manera que automatizando toda la metodología implementada en este trabajo y con el uso de imágenes satelitales se puede obtener información que permita estimar como una opción alterna los volúmenes de agua en una presa sin importar las condiciones de la calidad del agua.

Para mejores resultados se recomienda utilizar imágenes satelitales de mayor resolución y actualizar los estudios batimétricos, o el uso de drones para captar imágenes de mayor resolución, e implementar levantamientos topográficos LIDAR.

### Agradecimientos

Agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) y al Colegio de Posgraduados por el apoyo otorgado.

### Referencias

- Ariza, A., García, J. S., Rojas, B. S., & Ramírez, D. M. (2013). *Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN, corrección atmosférica e índices de inundación)*. Bogotá, Colombia: Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica del IGAC, UNSPIDER IGAC. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/313346186\\_Desarrollo\\_de\\_un\\_modelo\\_de\\_correccion\\_de\\_imagenes\\_de\\_satelite\\_para\\_inundaciones\\_CAIN\\_-\\_Correccion\\_Atmosferica\\_e\\_Indices\\_de\\_Inundacion](https://www.researchgate.net/publication/313346186_Desarrollo_de_un_modelo_de_correccion_de_imagenes_de_satelite_para_inundaciones_CAIN_-_Correccion_Atmosferica_e_Indices_de_Inundacion)
- Bonilla, F. M., Silva, G. S., Cabrera, M. C., & Sánchez, T. R. (2013). Calidad del agua residual no entubada vertida por dos parques industriales en la ciudad de Puebla, México. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 4(7), 1-36. DOI: 10.23913/ride.v4i7.83

- Chucos, B. N., & Vega, V. E. (2022). Evaluación de algoritmos de machine learning en la clasificación de imágenes satelitales multiespectrales, caso: amazonia peruana. *Ciencia Latina, Revista Multidisciplinar*, 6(1). DOI: 10.37811/cl\_rcm.v6i1.1843
- Chul, K. B., Hun, K. H., & Yeal, N. J. (2015). Classification of potential water bodies using Landsat 8 OLI and a combination of two boosted random forest classifiers. *Journal Sensors*, 15(6), 13763-13777. DOI: 10.3390/s150613763
- Chuvieco, S. (2002). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, España: Ariel.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2013). *Sistema Nacional de Información del Agua. Monitoreo de las principales presas de México*. Recuperado de <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=monitoreo>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Atlas del agua en México, edición 2018*. Recuperado de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/AAM2018.pdf>
- Feyisa, G., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, January 2014, 23-35.
- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167-182. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055

- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. DOI: 10.1080/01431169608948714
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Deering, D. W., & Schell, J. A. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation*. Monterey, USA: Remote Sensing Center.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025-3033. DOI: 10.1080/01431160600589179

**Municipal model evaluation for providing drinking water and sanitation services in a developing country**  
**Evaluación de modelo municipal para la provisión de servicios de agua potable y saneamiento en un país en desarrollo**

Kerlyn Lugo<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7040-5159>

Yorman Peraza<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5798-9516>

Adriana Márquez<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1305-5759>

Edilberto Guevara<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2813-2147>

Sergio Pérez<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6957-7287>

Eduardo Buroz<sup>6</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7600-8776>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Universidad de Carabobo, Municipio de Naguanagua, estado Carabobo, Venezuela, [kerlynlugo@gmail.com](mailto:kerlynlugo@gmail.com)

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Universidad de Carabobo, Municipio de Naguanagua, estado Carabobo, Venezuela, [msc.yorman.peraza@gmail.com](mailto:msc.yorman.peraza@gmail.com)

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Universidad de Carabobo, Municipio de Naguanagua, estado Carabobo, Venezuela, [ammarquez@uc.edu.ve](mailto:ammarquez@uc.edu.ve)

<sup>4</sup>Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales Universidad de Carabobo, Municipio de Naguanagua, estado Carabobo, Venezuela, eguvara@uc.edu.ve

<sup>5</sup>Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Universidad de Carabobo, Municipio de Naguanagua, estado Carabobo, Venezuela, sperez@uc.edu.ve

<sup>6</sup>Universidad Central de Venezuela. Academia Nacional de Ingeniería y Hábitat, Caracas, Distrito Capital, Venezuela, eduardo.buroz@gmail

Corresponding author: Adriana Márquez, ammarquez@uc.edu.ve

## Abstract

In this study, models for the provision of drinking water and sanitation services, were evaluated for the San Joaquin Municipality, Carabobo State, Venezuela, represented in the Municipal Autonomous Institute of Water of San Joaquin (IAGUASANJO, in Spanish) through three management indexes proposed in an integrated manner for drinking water and sanitation, a model index for the provision of drinking water services and model index for the provision of sanitation services. IAGUASANJO has oriented 65 % of the activities towards the provision of sanitation services and 35 % of the actions for the provision of the drinking water service in the period 2019-2023.

**Keywords:** Model index for the provision of sanitation services, model index for the provision of drinking water services, San Joaquin Municipal Autonomous Institute, drinking water and sanitation services, public services, public service management models.

## Resumen

En este estudio se evaluaron modelos de prestación de servicios de agua potable y saneamiento para el municipio San Joaquín, estado Carabobo, Venezuela, representado en el Instituto Municipal Autónomo del Agua de San Joaquín (IAGUASANJO) a través de tres índices de gestión propuestos de manera integrada para agua potable y saneamiento, un índice modelo para la prestación de servicios de agua potable y un índice modelo para la prestación de servicios de saneamiento. IAGUASANJO ha orientado el 65 % de las actividades hacia la prestación de servicios de saneamiento y el 35 % de las acciones para la prestación del servicio de agua potable en el periodo 2019-2023.

**Palabras clave:** modelo de índice de prestación de servicios de saneamiento, modelo de índice de prestación de servicios de agua potable, Instituto Autónomo Municipal de San Joaquín, servicios de agua potable y saneamiento, servicios públicos, modelos de gestión de servicios público.

Received: 30/04/2024

Accepted: 13/10/2024

Available ahead of print: 21/10/2024

Version of record: 01/11/2025

## Introduction

Since 1990, one of the main water sources used as a component within the drinking water supply systems to satisfy the needs of drinking water services (DWS) represented by the rivers in global regions such as Latin America, Asia and Africa have significantly increased their pollution (Tortajada, 2020). According to United Nations (UN, 2023), an important aspect is that for at least 3 billion people, the quality of the water they depend upon is indefinite due to an absence of monitoring, being one of the fundamentals of the construction base of the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically in that related to the availability and sustainable management of DWSS for all (SDG 6) (UN, 2023).

In Venezuela, the contemporary advance of the DWSS initiated in the 1940s with the creation of the National Institute of Sanitary Works (INOS, by its acronym in Spanish), when the Venezuelan government recognized the need to improve the supply of drinking water and the collection of wastewater as a transformation mechanism to overcome the serious technical and social impacts that its lack had on the health of the population (Peraza-Barreto *et al.*, 2022). During the 1960s and 1970s, the DWSS had substantial financial funds that permitted INOS to construct most of the large water production, transportation, purification, and distribution systems in the country's main cities (Corrales, 2004). During the 1970s and 1980s, INOS concentrated its efforts on the construction of large works (mainly reservoirs), giving lower priority to the maintenance and rehabilitation of the DWSS networks and to the efficiency in the operation and commercialization of the DWSS (Corrales, 2004; Peraza *et al.*, 2021; Peraza-Barreto *et al.*, 2022; Lugo *et al.*, 2023). At the beginning of 1990, the government proceeded to create a new

institutional arrangement for the DWSS operation, which consisted of the creation of a central company (HIDROVEN) and ten regional hydrological companies on a temporary basis until such time as the transfer to municipal authorities (Huguet-Sierra, Márquez-Romance, Guevara-Pérez, Pérez-Pacheco, & Buroz-Castillo, 2023a; Huguet-Sierra, Márquez-Romance, Guevara-Pérez, Pérez-Pacheco, & Buroz-Castillo, 2023b). In the period between 2000 and 2010, the new government approved a new legal framework that would provide stability and security to the transfer process from regional companies to the municipal governments, as well as to the community participation (Corrales, 2004; Corrales, 2008).

In this study, the experiences of DWSS management model in the San Joaquin Municipality (SJM), Carabobo State (CS), which is made up of direct-complex public management represented by the San Joaquin Water Autonomous Municipal Institute (IAGUASANJO, in Spanish) affiliated to the SJM-CS mayor's office, and the Central Hydrological Company (HIDROCENTRO) belonging to Hydrological Company of Venezuela (HIDROVEN, in Spanish). The institutional reform is based on the horizontal structure of the DWSS industry, where the processes of capture, storage in artificial water reservoirs, treatment and distribution of the drinking water obtained from the water surface source as well as the collection and treatment of the wastewaters are performed by the regional company (HIDROCENTRO) and IAGUASANJO is complying a type of joint work to rehabilitate, maintain, extend the DWSS, with a special emphasis in a sustainable use of the SJM-CS aquifer as a water source to satisfy the need of an important fraction of the inhabitants within the SJM-CS, all these actions within the frame of the municipal transferring process from regional company to the municipal institution in compliance with the

national DWSS regulation (Peraza *et al.*, 2021; Peraza-Barreto *et al.*, 2022; Lugo *et al.*, 2023).

Based on the foregoing, the objectives of this research are: i) to identify the institutional arrangement of the companies providing DWSS in the SJM-CS ii) to analyze the DWSS provision models in the SJM-CS, iii) to establish the management model of the DWSS in SJM-CS, iv) to create the DWSS provision model indexes in the SJM-CS. The creation of new DWSS provision indexes in the SJM-CS will involve to estimate to three management indexes, including an integrated index for drinking water and sanitation services, a model index for the provision of drinking water services and a model index for the provision of sanitation services.

## Methods

### Study area

Study area comprises San Joaquin municipality within the Carabobo state (SJM-CS), located at the central-northern region of the Bolivarian Republic of Venezuela, whose geographic coordinates involve, latitude between N 10°14'00" and N 10°21'30", longitude between W 67°43'00" and W 67°52'00", which encompasses a total area of 130.75 km<sup>2</sup> (Figure A1). The land use and land cover (LULC) distribution are the followings (Figure A1): 1) vegetation: 49.16 km<sup>2</sup> (37.6 %), 2) urban: 13.21 km<sup>2</sup> (10.11 %), 3) natural soil: 62.41 km<sup>2</sup> (47.73 %), agricultural: 1.94 km<sup>2</sup> (1.49 %) and water bodies 4.01 km<sup>2</sup> (3.07 %). LULCs were obtained using the supervised classification technique from the software ENVI V 4.7 (license: 9F3GP-B8TB6-9F7MT-FP8P4-94W92) and the software ArcGIS V

10.0 (license: 37105865) (Márquez, Guevara, & Rey, 2019a; Márquez-Romance, Farías-de-Márquez, & Guevara-Pérez, 2022a).

## Phases of the investigation

### Identification of the institutional arrangement of the companies providing DWSS in the SJM-CS

The institutional arrangement for the provision of DWSS in the SJM-CS has legal fundamentals mainly in three laws: 1) Organic law for the Provision of the Drinking Water and Sanitation Services (OLPDWSS) (National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela, 2001); 2) Law of Partial Reform of the Organic Law for the Provision of Drinking Water and Sanitation Services (National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela, 2007b), and 3) Ordinance of the San Joaquin Water Municipal Autonomous Institute (Municipal Gazette No. 4664, 2020), created by Municipal Council according to the extraordinary edition N° 4664.

### Analysis of DWSS provision models in the SJM-CS

The depth of the changes carried out in the San Joaquin Municipality due to the creation of the IAGUASANJO incorporates aspects such as the technical and organizational restructuring of the DWSS, the development of markets, the creation of a new legal framework, the elimination of some public organizations and the creation of new decision-making bodies, the redistribution of power centers and the reduction and retraining of personnel.

## Establishment of the management models of the DWSS in SJM-CS

Establishment of the DWSS management model in the SJM-CS is a combination of a mixed public administration (direct and delegate) with the participation of private organizations, which will be analyzed in its components, reflecting advantages and disadvantages. The selection has sought to guarantee collective well-being in terms of universal access to the service, at low cost and of the quality necessary to preserve and maintain public health.

The evaluation of the DWSS provision models involved the description of the performance of two providers, one at the municipal level represented by IAGUASANJO and the comparison with other providers in terms of regulation, coverage and quality, as well as the activities of DWSS management in the SJM-CS. two variables were considered within the management model in the SJM-CS (Peraza *et al.*, 2021):

1. Comparison of the institutional regulation of the DWSS in the SJM-CS: which was based on the Partial Reform Law of the Organic Law for the Provision of Drinking Water and Sanitation Services (National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela, 2007a) and the ordinance for the creation of the San Joaquín Municipal Water Institute (IAGUASANJO) by the Municipal Council of San Joaquín in the extraordinary edition No. 4664 dated July 14, 2020 (Municipal Gazette No. 4664, 2020).

2. Comparison of DWSS coverage in the SJM-CS, which was based on the graphical representation of the following five DWSS management variables:

a) Comparison of the social and operational variables of the DWSS in the SJM-CS: recorded by the National Institute of Statistics (INE) of Venezuela (INE, 2011), obtained from the census carried out in 2011 in the SJM-CS, and represented using the MATLAB software, whose license is associated with the Hydrological and Environmental Research Center of the University of Carabobo (CIHAM –UC).

b) Comparison of the records of water production from underground sources in the SJM-CS: the information on the production of underground sources in the SJM-CS was obtained from IAGUASANJO, HIDROCENTRO, the Ministry of Environment and Natural Resources (MARN), as well as the undergraduate and master's theses of the UC assisted by CIHAM - UC such as Márquez, Guevara and Rey (2019b); Márquez and Carrillo (2015), and Márquez and Peraza (2018).

c) Comparison of the hydrogeochemical variables of the underground sources in the SJM-CS, which was extracted from the databases used in Márquez, Guevara, Pérez and Rey (2020); Márquez *et al.* (2019a); Márquez *et al.* (2019b); Márquez, Guevara, and Rey (2018), and from a study of six wells of communal councils and the Mayor's Office managed by IAGUASANJO, whose sampling and analysis was carried out by the laboratory accredited by the Ministry of Ecosocialism and Water (MINEA), HIDROLAB-TORO in the present year 2021 (HIDROLABTORO & IAGUASANJO, 2021).

d) Comparison of evolutionary records of the provision of SAPS from 1950 to the present. It was obtained from reports from the Central Office of Statistics and Informatics (OCEI, 1996), INE (2001), HIDROVEN-CAF (2002) and Corrales (2004).

e) Comparison of the management variables of the Public Works Directorate of the SJM-CS and IAGUASANJO: it was obtained from the presidency of IAGUASANJO (IAGUASANJO, 2021). These variables have been requested based on those observed from the international courses on commercial management for water, drainage and sanitation operating organizations (Water Center for Latin America and the Caribbean-Tecnológico de Monterrey (Centro del Agua para América Latina y el Caribe, 2012), hydrogeology (CODIA & AECID, 2012) and policies on the sustainable use of water and the efficient provision of related public services (CEPAL, 2009).

### **Creation of DWSS provision model indexes in the SJM-CS**

For the model for the provision of drinking water and sanitation services (MPDWSS): the estimation of three indexes of the model for the provision of drinking water and sanitation services (IMPSAPS) is proposed, discriminated by the activities provided in water services drinking water (IMPSAP) and sanitation service delivery model index (IMPSS) at the municipal scale based on the activities carried out by the Public Works Department of the San Joaquín Municipality and the San Joaquín Municipal Water Institute (IAGUASANJO) during the period 2019-2021. The index is formulated according to the procedure applied by López, Márquez-Romance, and Guevara-Pérez (2020); López-Calatayud, Márquez-Romance, and Guevara-Pérez (2022c); López-Calatayud, Márquez-Romance, Guevara-Pérez, Pérez-Pacheco and Buroz-Castillo (2023) for the design of the tropical wetland management model.

The method consists of the definition, formulation and elaboration of an integrated multi-criteria matrix (MCM), which characterizes a group

of procedures hypothetically capable of refining the transparency, auditability and systematic consistency of these decisions (Dunning, Ross, & Merkhofer, 2000). MCM can be defined as a decision model which contains (Hajkowicz & Collins, 2007; López-Calatayud *et al.*, 2023; López *et al.*, 2020; López-Calatayud, Márquez-Romance, & Guevara-Pérez, 2021; López-Calatayud, Márquez-Romance, & Guevara-Pérez 2022a; López-Calatayud, Márquez-Romance, Guevara-Pérez, & Buroz-Castillo, 2022b; Márquez-Romance, & Guevara-Pérez 2022a): 1) a set of decision options which need to be categorized or scored by the decision maker; 2) a set of criteria, typically measured in different units; and 3) a set of performance measures, which are the raw scores for each decision option against each criterion. The MCM model is represented by an evaluation matrix  $X$  of  $n$  decision options and  $m$  criteria or variables. The raw performance score for decision option  $i$  with respect to criterion  $j$  is denoted by  $x(i, j)$ . A minimum requirement for the MCM is to contain at least two criteria and two decision options ( $n \geq 2$  and  $m \geq 2$ ). The importance of each criterion is generally given in the vector of dimensional weights  $W$  containing  $m$  weights, where  $w_j$  denotes the weight assigned to the  $j$ th criterion (Hajkowicz & Collins, 2007). The MCM is defined with two (2) components associated with the activities carried out in drinking water and sanitation services, respectively; and it is composed of two commonly applied value functions (Hajkowicz & Collins, 2007), which are weighted addition and weighted multiplication. The weighted sum model is often expressed as (López-Calatayud *et al.*, 2022a):

$$u_i = f(X, W) = \sum_{j=1}^m x_{i,j} w_j \quad (1)$$

The weights ( $w_j$ ) are non-negative and add to 1, and  $x(i, j)$  is a performance score transformed to a scale from 0 to 1 where 1 represents the best performance. The general performance score for each option is given by  $u_i$ , according to the management model of each country and criteria or variables that are measured by the attributes  $j$ .

## Results and discussion

### Identification of the institutional arrangement of the companies providing DWSS in the SJM-CS

#### Institutional arrangement for the provision of services during the period 1950-1990

The current institutional arrangement of the DWSS sector began in Venezuela in the 1940s, with the creation of the National Institute of Sanitary Works (INOS, by its acronym in Spanish) for the year 1943. Venezuelan government recognized the need to improve the supply of drinking water and the collection of wastewater as a vehicle to overcome the serious impacts that its lack had on the population's health. The effort made by the country in this matter was particularly notorious during the fifties, sixties and seventies, and achieved greater success in the supply of drinking water than in the collection of effluents. The process was characterized by two fundamental factors. The first factor involved a planning and service management model predominantly centralized in INOS, financed from the national budget, which allowed to rise the coverage by extending drinking water networks to almost the entire national territory. The second factor was associated with a sectorial

strategy that gave priority to health and social solidarity purposes, minimizing the quality of the DWSS and the economic efficiency of the provision (Corrales, 2000).

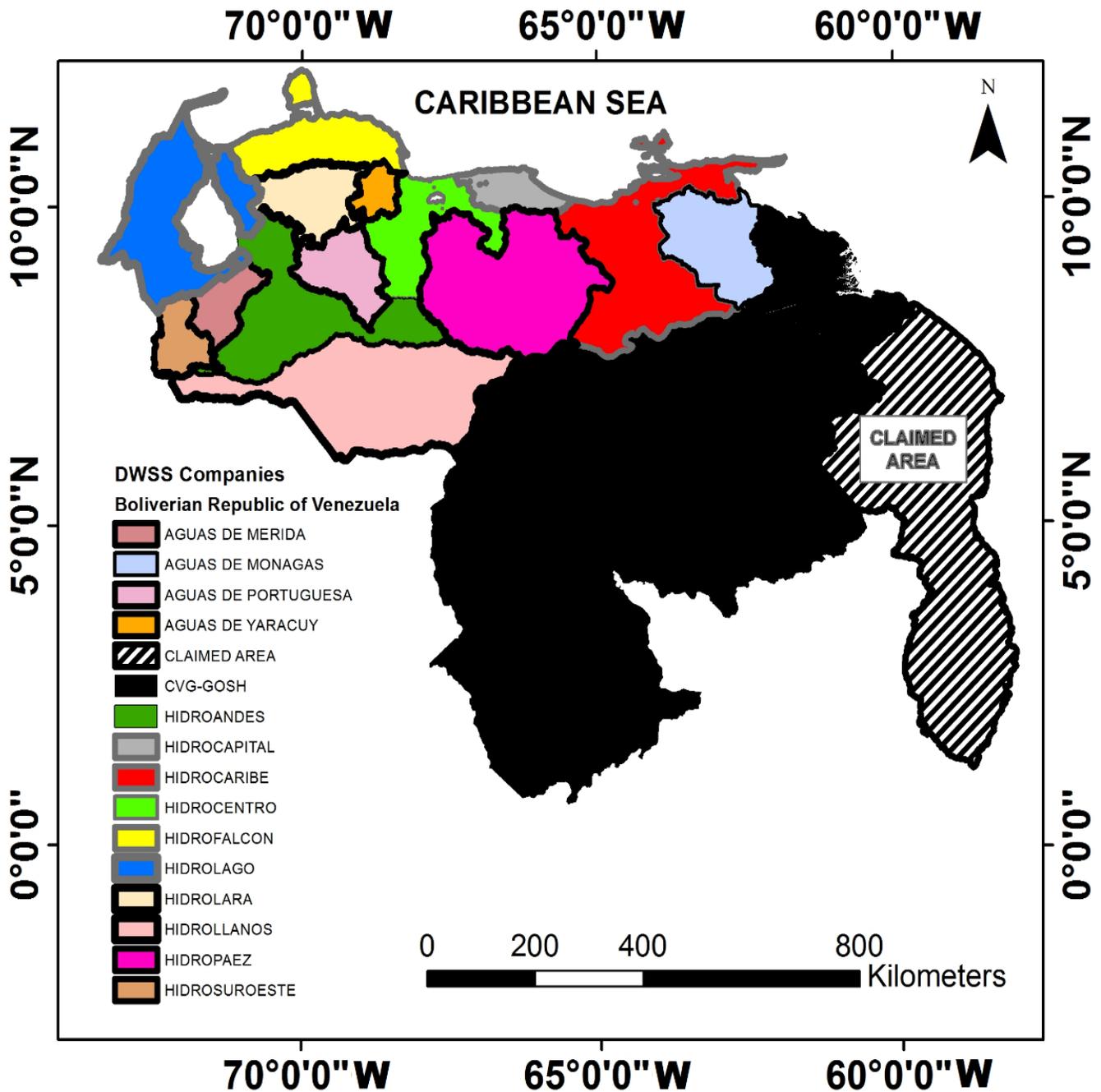
The evolution in the DWSS coverage for Venezuela during the period from 1950 to 1990, can be observed in Figure A2, the first quartile is representing the augmentation in the DWSS provision close to 20 %. Total drinking water services (Aqueduct, Public Fountain, and Truck) climbed from 49.2 to 71.7 % from 1950 to 1961, having changed the DWS coverage associated only to the aqueduct from 25.4 % to 46.1 %. In the same manner, the total sanitary services (TSS) coverage (sewer, septic tank, and latrine) rose from 40.5 to 62.4 % (Figure A2), corresponding to those only associated to the sewer, to a change from 16.5 % to 27.4 %. During the fifties, the largest historical percentage of the gross domestic product (GDP) was dedicated to investment in infrastructure. For the years 1956-1958, the economy's effort amounts to 10 % and per capita investment is at levels close to US\$ 90 per inhabitant, at constant 1957 prices (Corrales, 2008).

For the years 1961 and 1971, the census showed increases mostly focused in the construction of the aqueduct and sewerage network, reaching coverage for DWS of 46 and 72.4 %, as well as for SS of 27.43 % and 40.3 %, respectively. For the last two decades in the period 1950-1990, the investment in the creation of the DWSS was decreased and the results indicated lower growth progression of approximately, for DWS (aqueduct) of 6 and 4 %, respectively; while for SS (sewer), of 16 % and 8 %, respectively (Figure A2). The results obtained were also similar to those of other countries in the region. Starting in the 1980s, the impossibility of supporting the sector using public budgets became evident, a process of constant deterioration of quality and coverage

indicators began, and the development and centralized model of service delivery collapsed, product of the low efficiency and prevalence of individual interests in generalized corruption of the operating institutions.

### **Institutional arrangement for the provision of services during the period 1990-current time**

Starting in 1989, a restructuring process of the Venezuelan public sector began, which included the comprehensive restructuring of the DWSS. The basic principles of this process were: 1) to recover and improve the quality of services, b) to decentralize services and return powers to municipal governments, c) to progressively achieve operational and financial autonomy of the service, d) to promote a modern regulatory framework that would give it stability and encourage the participation of private agents. In 1991, the INOS liquidation process began, which was legally consolidated with the Law to abolish the Institute approved in 1994. For the DWSS provision, a transitory scheme was installed until the process of transferring powers to municipal authorities. This scheme was made up of ten regional hydrological companies (RHC) (Figure 1), responsible for the operation of the systems and the DWSS provision throughout the country. The Hydrological Company of Venezuela (HIDROVEN, by its acronym in Spanish) was established as a parent company without operational functions (Figure 1), responsible for sectorial planning, coordination of the decentralization program, regulation and control of the RHC, as well as the promotion and search for resources for sectorial investments.



**Figure 1.** Spatial distribution of the hydrological companies for drinking water and sanitary services (DWSS) affiliated to Hydrological Company for Venezuela (HIDROVEN by its acronym in Spanish) and decentralized companies in the Bolivarian Republic of Venezuela founded in the period 1990-1991. Adapted from Corrales (2004).

During the period 1991-1998, within the framework of the consolidation of transitory structures, five decentralized companies (Aguas de Mérida, Aguas de Monagas, HIDROLARA, Aguas de Portuguesa, and Aguas de Yaracuy) were created (Figure 1), with the participation of the respective governments and municipalities, to which DWSS were transferred. The incorporation of private operators was carried out under the creation of contracts under the modality of integral management, which promoted the consolidation of the companies HIDROLARA and Aguas de Monagas in the period 1991-1998 and of the Company HIDROLAGO in the subsequent period 1999-2002 (Corrales, 2008). The integral management, it is a type of public indirect management, in which the integral management of the service is contracted to a private operator. The remuneration of the company, in general, is associated with improvements in operating efficiency. Contract terms are generally set at five years. Due to contracting terms, there is a risk that short-term solutions are preferred over long-term ones (Corrales, 2000).

Starting in 1999 with the arrival of the new government, the importance was placed on the approval of a new legal framework that would sanction the process to be convened stability and security. On December 31, 2001, the Organic Law for the Provision of Drinking Water and Sanitation Services (OLPDWSS) (National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela, 2001) was approved, which constituted the legal framework that ordered the DWSS provision in the country.

According to the OLPDWSS's article 134, it was established that the Venezuelan Hydrological Limited Company (HIDROVEN) would be the responsible body, throughout the national territory, for the transfer of DWSS provided by the National Executive Power to the metropolitan

districts or municipalities, whose action might not last more than five (5) years from the OLPDWSS publication. As it is indicated in the National Assembly of The Bolivarian Republic of Venezuela (2001), until the transfer occurs, the entities that currently provide the DWSS would continue to do so under the supervision of the HIDROVEN.

At the present, the national map that shows the DWSS operators for the end of 1998 and the beginning of 1999 (Figure 1), has remained without significant changes. Despite this transfer effort, approximately 80 % of the national population continues being served by HIDROVEN and its affiliated companies, due to the fact that the reversion process has not been focused on the regions that concentrated the large cities from the country.

According to the population census for the year 1990, the DWSS coverage in Venezuela was categorized related to the social stratum (Figure A3). For DWS using aqueduct network, the formal area of the city (FAC) included to those types of housing infrastructures associated to country houses, houses, apartments, and tenement houses, in which the coverage reached 87.1 %, whose informal settlements —ranches— within the city (ICS) were supplied until 48 %, while those placed in the rural areas as features of peasant ranches (RIS), were attended in approximately 28.3 %. The industrial states of the country resulted with high DWS coverage (FAC, ICS, RIS), being FAC from medium to high levels including (Figure A3a), Capital District (92.1, 64.9, and 41.8 %), Carabobo (86.3, 42.5 and 28.3 %), Aragua (89.8, 44.4 and 36.2 %) and Miranda (90.8, 52.4 and 41.8 %), while the situation seemed to be suitable in Delta Amacuro (80.3, 5.9 and 10.9 %). The situation of greatest demand of DWS coverage might be associated to the states located at the south of the country with a DWS coverage between low and

medium levels such as Apure (69, 34 and 6 %) and Amazonas (76, 38.2, and 20.6 %). With regard to SS for 1990, a similar pattern was found with coverage values in the industrial states that corresponded to high for FAC and low to medium for ICS and RIS, reaching low to medium values in the states mostly placed at the south of the country and also traditionally poorest (Figure A3b). For the year 2001, the industrial states rose in a significant way their DWSS coverage, especially in the ICS obtaining around 20 %, at the same time, a slower process was developing in the states at the south of the country (Figures A3c- A3d).

The differences found in the percentage of the DWSS coverage in Venezuela between the decade of the 1980s and the starting of the decade of the 2000s, consolidates a tendency to reduce investment in infrastructure. The average effort in the eighties does not exceed 2.5 % of annual GDP, while in the nineties it barely exceeds 1.5 %, a figure that does not even assure the amounts necessary for the maintenance and adaptation of the existing infrastructure. For the years 2000 and 2001, according to estimates based on the Central Bank of Venezuela (BCV, 2002), the percentage of GDP assigned to investment in infrastructure remained close to these same levels (1.4 % for 2000 and 1.7 % for the 2001). The irregular evolution of the effort made only magnifies the deviations that occur in economic development, which deteriorates at levels that are close to stagnation (Corrales, 2008). Despite the reduction in the infrastructure investment and GDP experienced during the period 1990-2001 discussed above, the transformation in the institutional arrangement had a positive effect over the DWSS coverage maintaining a permanent increase influenced mainly by the socio-economic status of the involved states at national scale, concentrating the greatest increase

to those states located in the central-northern region of Venezuela (Figure A3).

The population assisted by the hydrological companies for DWSS affiliated to HIDROVEN and decentralized companies in the Bolivarian Republic of Venezuela recorded in the XIII population census of 2001 (INE, 2001) is shown in Figure A4, where it is observed that the highest concentration of population has corresponded with the absolute frequency related to the amount of inhabitants (2 382 560-4 465 267) linked to the industrial states located mainly at the central-northern region of the country (Miranda, Aragua, Carabobo, Cojedes, Zulia). This scenario is due to the fact that Caracas, Valencia, Maracay and the other cities and municipalities connected by highways of the first order and the main seaports of the Capital and Central regions (Federal District and the States of Miranda, Aragua and Carabobo), where precisely the 70 % of the municipalities is located with more than 2 500 employees. The location of these establishments depends on the existence of population centers, hence the location of the industry is closely related to the presence of large urban centers (Gómez, 1997; Lucena & Álvarez, 2011). According to the values of the Central Office of Statistics and Information (OCEI) and dates from the year 1994 (OCEI, 1996), the largest number of jobs and production matched with the capital region (155 572; 3619 million USD) and central region (141 692; 6447 million USD), closely followed by Central-Western, Zulia and Guayana regions.

At national scale, the evolution of the DWS and SS coverage during the period 1994-2002 can be seen in Figure A5 and Figure A6, and Figure A7 and Figure A8, respectively. With respect to the affiliated companies to HIDROVEN and decentralized companies, it is observed that there was permanent and consistent spatial distribution pattern being the highest

DWSS coverage associated to the companies of the central-northern region of the country (HIDROCAPITAL, HIDROCENTRO), and in sequence with the level of the coverage supplied to the state of the country, the order would involve to the north-western companies (HIDROFALCON, HIDROLAGO, Hidrosuroeste Aguas de Yaracuy), the north-eastern companies (HIDROCARIBE, HIDROPAEZ) and the southern companies (HIDROLLANOS). Mostly, the decentralized companies were created and their functions executed at the end of the period 1993-1994 (Figures A5h-A5f, Figures A7f-A7h), which include Aguas de Mérida, Aguas de Portuguesa, Hidrolara. Figure A6 shows that the decentralized companies (HIDROLARA, Aguas de Yaracuy, Aguas de Portuguesa, Aguas de Monagas) arose in the analyzed period and promptly achieved DWS coverage levels equivalent to those of the affiliated companies of HIDROVEN in the central-northern region of Venezuela, which represented occurrence frequencies to more than 80-90 % in the provision of DWS. The lowest coverage in DWS is associated to the HIDROLLANOS performance, however an increase was observed from 40 to 70 %, finding the fraction of the values linked to the DWS coverage that occurred between the 25 to the 50 % of time positioned from 55 to 65 % of coverage for those regions of the country (Figure A8) With respect to the SS. Figure A8 shows that with high frequency the SS coverage values occurred between 25 and 50 % of time in the interval from 50 to 65 % for the companies north-western, north-eastern and south region of the country, the highest and the lowest coverage in SS is attributed to central-northern region (HIDROCENTRO, HIDROCAPITAL, HIDROCARIBE) and the south region (HIDROLLANOS), respectively.

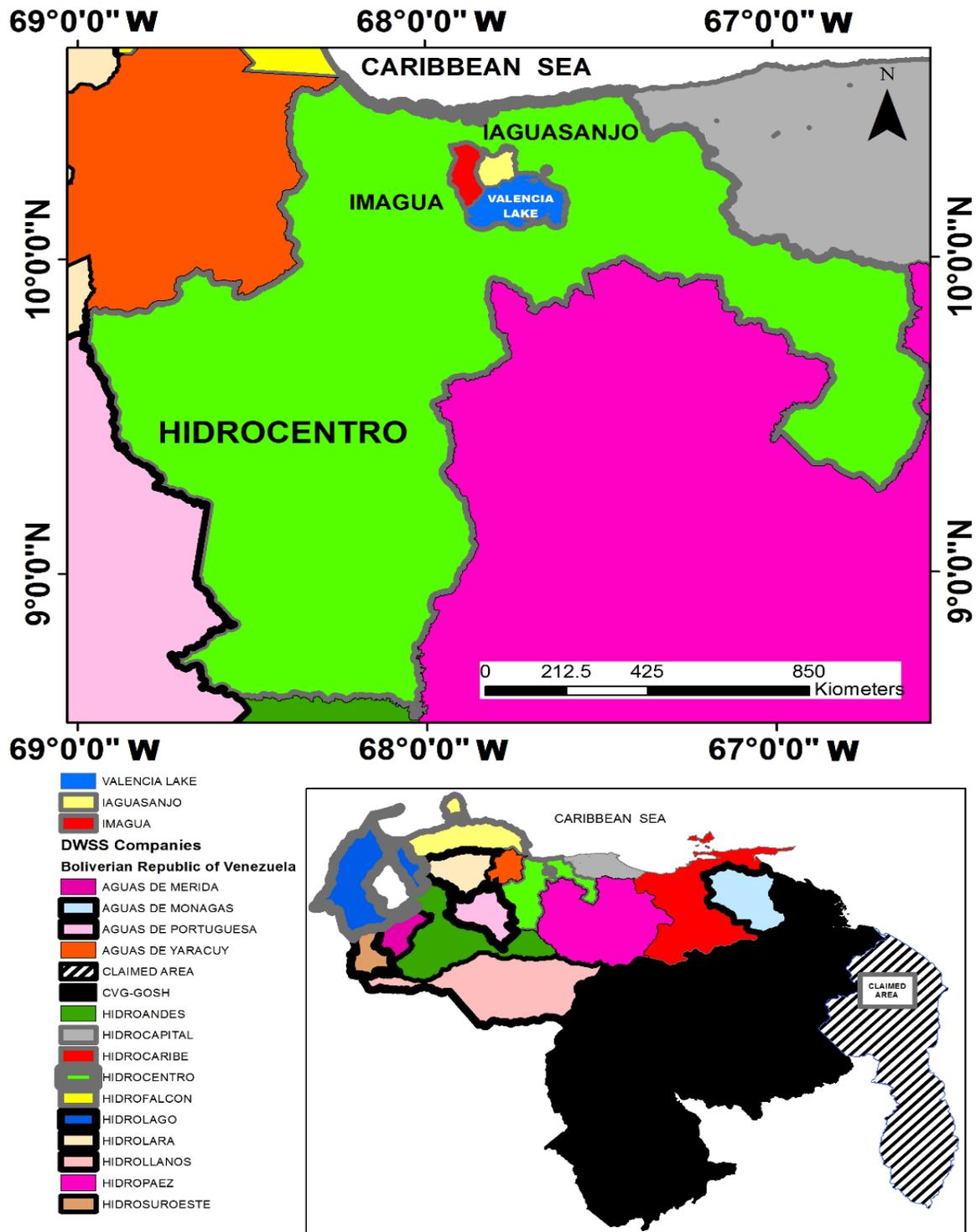
The results obtained in the adaptation period related to the years 1994-2002 associated to the transformation in the institutional

arrangement, transiting from INOS, as a centralized body for the management of the DWSS provision in the country, to the companies affiliated with HIDROVEN and the decentralized companies, were effective and brought relatively rapid increases in the DWSS coverage that could be observed in the period 1994-2002 (Figures A7-A10), at least in the formal area in the cities using mainly pipe network systems for aqueduct and sewer in both, the complex direct public management model (HIDROVEN) and indirect public management model (decentralized companies). According to Corrales (2000), experience has shown that the transition from one model to another is slow and complex. It is possible that some of the changes proposed in the property regime or in the legal framework can be brought forward rapidly, while the changes associated with behavior or institutional development processes present serious lags.

The operating expenses coverage (Figure A10), by HIDROVEN and its ten affiliated companies achieved to reach values from 40 to 90 %, which show a significant effort to overcome the pattern of dependence on transfers from the Central Government to cover the operating expenses of the service. However, there is still an absolute dependence on the sector to meet its investment needs for rehabilitation and expansion of the systems (Corrales, 2004).

## **Institutional arrangement for the DWSS provision for the municipal government since 2020, with emphasis in the experience of the creation and operation of the San Joaquin Water Autonomous Municipal Institute, Carabobo state, Venezuela**

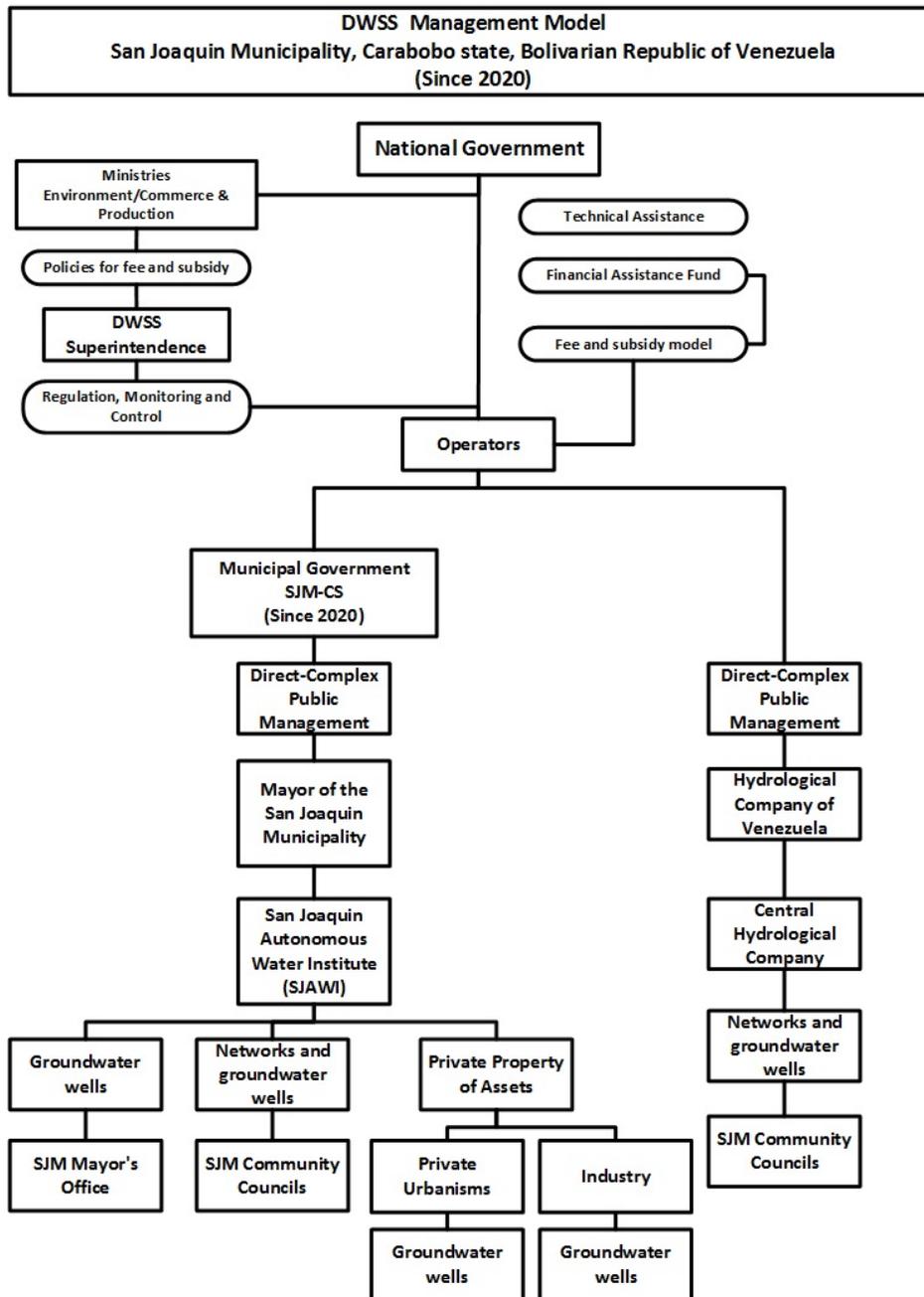
In Venezuela, at municipal scale, currently there are only two municipalities corresponding to Guacara and San Joaquin, located in the Carabobo state, that have created and implemented water autonomous municipal institutes of public property, named as Guacara Water Municipal Autonomus Institute (IMAGUA, by its acronym in Spanish) (Figure 2) operating since 2019 (Reyes & Márquez, 2019) and San Joaquin Water Autonomus Municipal Institute (IAGUASANJO) (Figure 2), belonging to San Joaquin Municipality (Peraza *et al.*, 2021; Peraza-Barreto *et al.*, 2022; Lugo *et al.*, 2023). These two municipal institutes have been performing functions of DWSS provision within the region covered by one of the ten affiliated companies of HIDROVEN company, known as Central Hydrological Company (HIDROCENTRO) (Figure 2), in compliance with what is established in Article 2 of the Partial Reform Law of the Organic Law for the Provision of Potable Water and Sanitation Services (National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela, 2007a).



**Figure 2.** Water Municipal Autonomous Institutes located in the Carabobo state, Bolivarian Republic of Venezuela.

IAGUASANJO (Figures A1, 2), was created according to the Ordinance, published in the Municipal Gazette, Year XXXI, San Joaquin, July 14th, 2020, Extraordinary Edition No. 4664, whose powers encompasses the construction, rehabilitation and maintenance of sewage collectors; construction and rehabilitation of aqueduct networks, predictive, preventive and corrective maintenance of deep wells for drinking water, registration of deep wells for drinking water, treatment plants and pumping stations of wastewater, registry of users of deep wells administered by the municipality, as well as, the comprehensive management of water resources in the SJM-CS (Peraza *et al.*, 2021; Peraza-Barreto *et al.*, 2022; Lugo *et al.*, 2023).

In Figure 3 it is observed the management model for the drinking water and sanitation services in SJM-CS, which has been configured according to that established in the OLPDWSS, the municipal management model for the DWSS provision in SJM-CS is a direct-complex public management model by two public institutions, in which the actions of two public institutions coexist represented by the municipal government (IAGUASANJO) and the regional company (HIDROCENTRO) (Peraza *et al.*, 2021; Peraza-Barreto *et al.*, 2022; Lugo *et al.*, 2023). According to Corrales (2000), under direct-complex public management, the DWSS is provided through a publicly owned autonomous company or institute, in which the investments are partially or totally financed by the company, and there is a strong tendency to resort to financing from public funds. In agreement with EUREAU (2020), within the European countries, only England and Wales, United Kingdom, implemented a modernization program that led to privatization with the transfer of ownership of all previously public water companies.



**Figure 3.** Model for management of the drinking and sanitation services (DWSS) in San Joaquin Municipality, Carabobo state (SJM-CS), Bolivarian Republic of Venezuela according to the Organic Law for the Provision of Drinking and Sanitation Services (National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela, 2001).

## Analysis of DWSS provision models in the SJM-CS

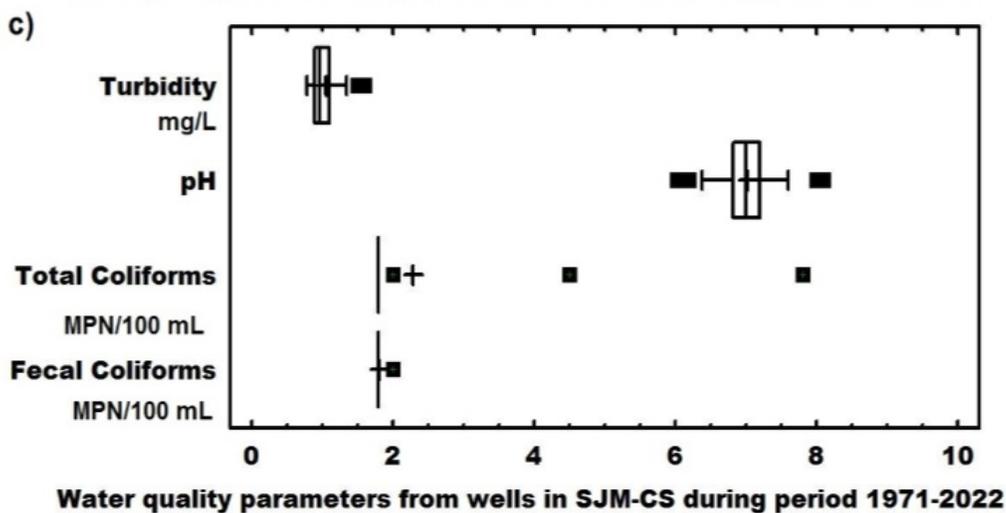
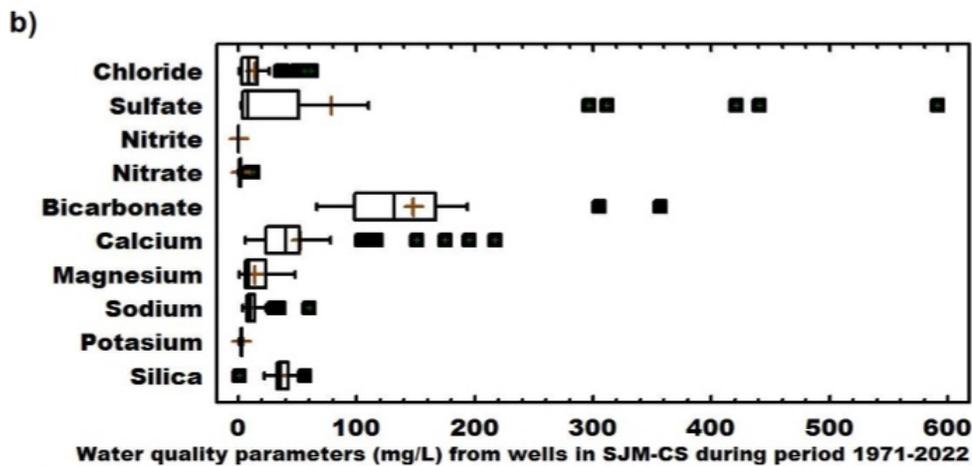
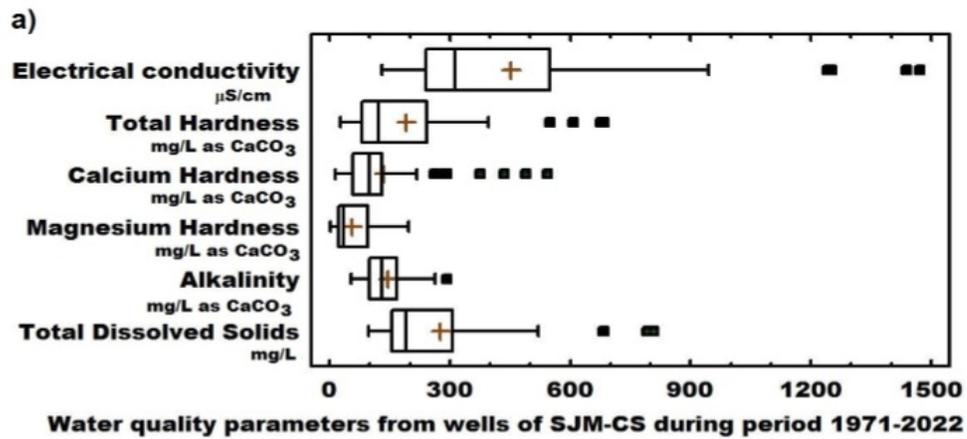
According to the Ordinance (article 11) (Municipal Gazette No. 4664, 2020), IAGUASANJO has powers in the control, supervision, inspection of the use of drinking water and private systems, either individuals or groups, of collection, treatment and disposal of wastewater, in those areas where the Central Hydrological Company (HIDROCENTRO) has not developed any type of system in relation to the DWSS provision. From its creation, IAGUASANJO is carrying out its DWSS management characterized in assuring efficient levels of DWSS coverage, with special emphasis to guarantee for the DWS, a high performance in terms of continuity, pressure and water quality. In addition, IAGUASANJO is part of work team within pilot projects for applying in situ an ex situ bioremediation techniques in an aquifer contaminated with hydrocarbons (Márquez *et al.*, 2023; Márquez-Romance, López-Calatayud, Farías-De-Márquez, & Guevara-Pérez, 2022b; Márquez-Romance, Freytez-Boggio, Cárdenas-Izaguirre, Maldonado-Maldonado, 2022c), as well as for the water quality restoration in rivers the Carabobo and Aragua states, in which Ereigüe river, one of the main surface streams in the SJM-CS is included, using ex situ and in situ bioremediation techniques in order to contribute to protect the water sources within the municipality (Márquez-Romance *et al.*, 2023). These criteria are in agreement with the fundamentals of SDGs (UN, 2023), which by being compared with MDGs, the SDGs are more ambitious, exceeding the goal of increasing coverage with "improved water sources" and "improved sanitation solutions", adding considerations of service quality and affordability, ensuring

(surface or underground) sources of water, which implies advancing in the protection of ecosystems.

## **Water quality from the groundwater in the SJM-CS aquifer**

Water quality of the groundwater in the aquifer of SJM-CS used for human consumption and agricultural activities, has been evaluated by the Ministry of Ecosocialism (MINEC & IAGU&SANJO, 2020) and the records from 1970 to 2020 were joined with the results of the monitoring wells carried out by IAGUASANJO for 2021 whose evaluation was conducted by the HIDROLAB-TORO Laboratory, which is a laboratory certified by the Ministry of Waters (HIDROLAB, TORO, & IAGUASANJO, 2021) as well as the work on water sampling by IAGUASANJO during the year 2022 and its processing in the Territorial Unit of Water Attention affiliated to the Laboratory of the Ministry of Waters for 2022 (UTAA & IAGUASANJO, 2022). Figure 4 and Figure A11 show the depictions of water quality variables of the groundwater being pumped from the SJM-CS aquifer for human consumption through box-whisker diagrams and maps of the spatial-distribution of the physicochemical parameters determined in the period 1971-2022. In the urban area of SJM-CS (Figures 4-A11), all physicochemical variables have taken values below the acceptable maximum limits reported for the organoleptic quality (turbidity, total dissolved solids, total hardness, pH, chloride, sulfate, sodium) and inorganic compounds (nitrite, nitrate) in the article 14 of the Sanitary Standards for Drinking Water Quality (Sanitary Standards for Drinking Water Quality, 1998). The total coliforms and fecal coliforms have frequently resulted less than 1.8 MPN/100 ml, whose value is lower than 2000 MPN/100 ml indicated in the Official Gazette N° 5 (Regulations for

the classification and quality control of the waters of the Lake Valencia Basin, 1999), being considered as safe water (Guevara & Cartaya, 2004). In addition, a groundwater quality index (GWQI) was estimated following the Equation (1) (Table 1), giving as a result a value of 36.70, which is lower than 50 being categorized as an excellent groundwater quality (López-Calatayud *et al.*, 2022c).



**Figure 4.** Water quality parameters in groundwaters of wells in SJM-CS during period 1971-2022. Adapted from MINEC and IAGUASANJO (2020), Peraza-Barreto *et al.* (2022), UTA and IAGUASANJO (2022).

**Table 1.** Groundwater quality index for the SJM-CS aquifer based on mean values of physicochemical parameters represented in Figure 4.

Parameter	Unit	Sanitary Standards for Drinking Water Quality (1998)	wi	Wi	C <sub>i</sub>	qi	GWQI
pH	-	6.5-8.5	3	0.10	7.02	100.29	9.71
Turbidity	NTU	1	5	0.16	1.05	105	16.94
Total hardness	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	500	2	0.06	190.02	38	2.45
Total dissolved Solids	mg/l	1 000	4	0.13	274.61	27.4	3.54
Sulfate	mg/l	500	4	0.13	63.71	12.7	1.64
Chloride	mg/l	300	3	0.10	13.58	4.5	0.44
Nitrate	mg/l	10	5	0.16	1.22	12.2	1.98
Total coliforms	MPN/100 ml	0	5	0.16	< 1.8	-	-
Total			31	1			36.70

In the agricultural area (Figure A1, Figure 4), located commonly at the southern area of the SJM-CS, the analysis of the water quality for the irrigation is an important factor to prevent the salinization of the soils. Related to the electrical conductivity (EC) (Figure 4a), 50 % of values were found in a magnitude less than 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , what suggests that these waters has low salinity, aside the human consumption, they also might be used to irrigate most crops, in almost any type of soil with very little chance of salinity developing (Guevara, 2019; Guevara & Cartaya, 2004). By calculating the sodium absorption ratio (SAR) based on mean values of concentrations (meq/l) associated to ions including calcium (2.64 meq/l), sodium (0.61 meq/l), and magnesium (1.15 meq/l), it was obtained a SAR of 0.44, whose result can be combined with a mean value

of EC of 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ( $< 700 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), giving as a result that there is no restrictions for its use for irrigation of soils employed in the agricultural activity (Guevara & Cartaya, 2004). The third calculated index was the Mg index, taking into account the calcium and magnesium concentrations, to obtain a Mg index of 30.34, when this value is upper to 50, the water is considered hazardous for irrigation purposes. An excessive Mg absorption affects the soil unfavorably and can induce calcium deficiencies in crops (Guevara, 1990; Guevara & Cartaya, 2004). The fourth calculated index was the proportion of carbonates and sulfates, assuming the maximum values in the sample, it is compliment that the sum of the concentrations of calcium ion ( $\text{Ca}^{+2}$ ) (10.64 meq/l) and magnesium ion ( $\text{Mg}^{+2}$ ) (4 meq/l) for a total of 14.64 meq/l, are upper than the sum of the concentrations of bicarbonate ion ( $\text{HCO}_3^-$ ) (2.42 meq/l) and carbonate ion ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) (3.79 meq/l) for a total of 6.21 meq/l, expressed as the Equation (2):



As it was expressed by the result of the application associated to Equation (1), water can be classified under type II (Guevara, 2019; Guevara & Cartaya, 2004), this classification corresponds to when concentrating the water, part of the  $\text{Mg}^{+2}$  and  $\text{Ca}^{+2}$  precipitate in the form of carbonates. All the remaining  $\text{Mg}^{+2}$  remains in the solution. The remaining calcium precipitates in part, in the form of sulfate, but since calcium sulfate (gypsum) has a certain solubility (30 meq/l), part of the  $\text{Ca}^{+2}$  remains dissolved, therefore the SAR does not rise as much as class 1 (Guevara, 2019; Guevara & Cartaya, 2004). This result is consistent

with the fact that sulfate ion was slightly exceeding the acceptable maximum limit (400 mg/l) for waters in the subtypes 1A and 1B (Sanitary Standards for Drinking Water Quality, 1998), occurring as outside points in a proportion of close to more than 1.5 times the interquartile range (box width) above the box (Figure 4) and geographically positioned in the agricultural area at the southern region of the SJM-CS (Figure A11).

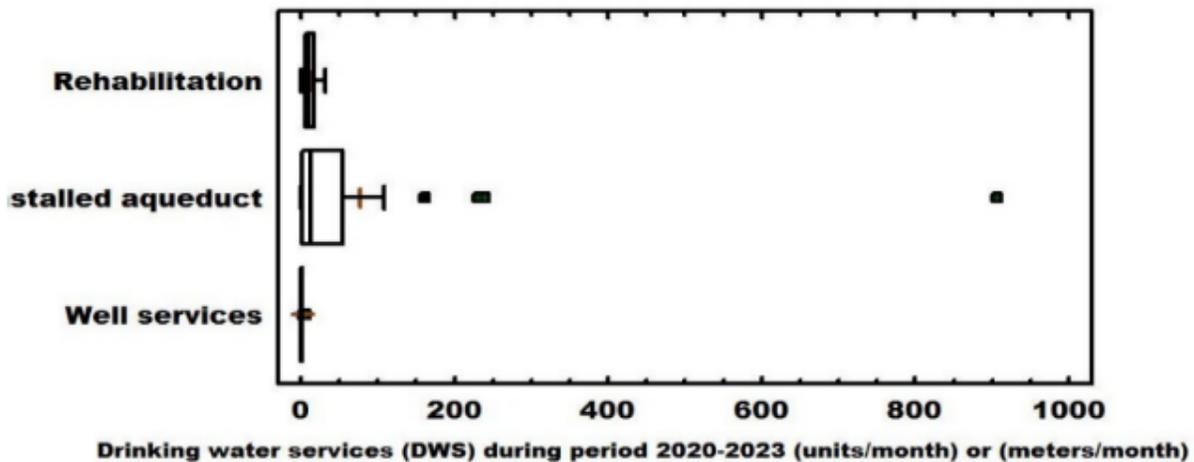
The pumped flow of the SJM-CS aquifer in the period 1971-2023 is shown in Figure A12 and Figure A13, represented by a sample of 72 wells registered in the IAGUASANJO cadaster (IAGUASANJO, 2021), whose flow rate has been distributed in 782 l/s for the urban use and 559 l/s employed in the agricultural uses, totalizing an approximated flow of 1 341 l/s extracted from the SJM-CS aquifer, being a component within the plans of integral management of the water resources of the hydrographic region of the Valencia Lake (National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela, 2007b). The highest flow rate pumped from wells varied between 40 and 60 l/s, which corresponded to wells located in areas owned by the Ministry of Agriculture and Land, and associated with the development of agricultural activity.

### **DWSS Provision in SJM-CS by municipal government**

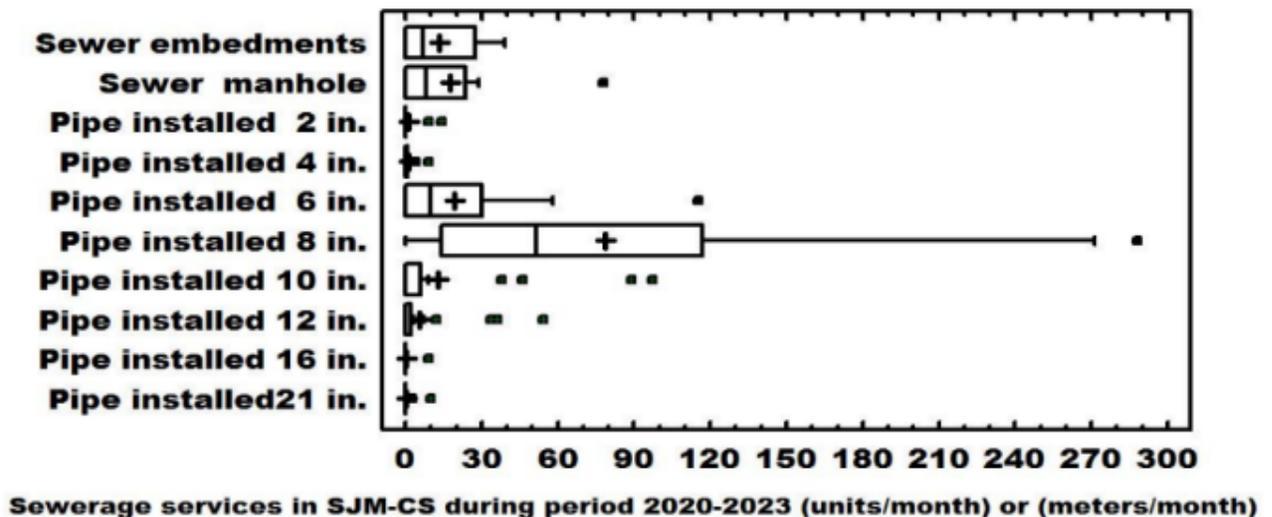
In general, with respect to the DWS coverage in the SJM-CS, 56 % coverage is carried out through the networks of the Central Regional Aqueduct, Stage II (Peraza *et al.*, 2021; Peraza-Barreto *et al.*, 2022; Lugo *et al.*, 2023), whose system has been administered from 1990 to the present by the HIDROCENTRO. From 2020 to the present, IAGUASANJO has executed a total of 331 actions of rehabilitation of pipe network stretches, with a maximum of 30 monthly rehabilitation actions (Figure

5a). Another purpose has consisted of 1 995 m involved in the installation of extended stretches of the drinking water pipe network (Figure 5a), including a monthly maximum value of 906 m, occurred for 2021.

a)



b)



**Figure 5.** DWSS implemented by IAGUASANJO, SJM-CS, Venezuela, expressed as units/month or meters/month (aqueduct installed), during period 2020-2023.

The sewerage network has complied more than 30 years of service, it was designed considering the transport of wastewater flow rate of until 5.03 m<sup>3</sup>/s for 2020 (López & González, 2003). From 2020 to the present, the total of provisions of sanitation services by IAGUASANJO has covered the following six activities (Figure 5b) (Peraza *et al.*, 2021; Peraza-Barreto *et al.*, 2022; Lugo *et al.*, 2023): 1) 108 cleaning, inspection and reconstruction of embedments to the wastewater collector networks; 2) 166 cleaning and inspection of manholes; 3) 32 meters of rehabilitation of 2-inch collectors; 4) 29 meters of rehabilitation of 4-inch collectors; 5) 502 meters of rehabilitation of 6-inch collectors; 6) 2 046 meters of rehabilitation of 8-inch collectors; 7) 334 meters of rehabilitation of 10-inch collectors; 7) 147 meters of rehabilitation of 12-inch collectors; 8) nine meters of rehabilitation of 12-inch collectors, and 9) 45 meters of rehabilitation of 21-inch collectors.

### **Establishment of DWSS provision models in the SJM-CS**

The establishment of the new model for the DWSS provision for the SJM-CS, is focused to guarantee the supply, management and conservation of drinking water (Table 2). Table 2 presents a summary of the characteristics of the components of the DWSS provision model in the San Joaquin Municipality, Carabobo State, which includes the type of operator, the service model, the regulatory framework, the source of financing, tariff policies and subsidy systems, as well as functions. In the DWSS management model, HIDROCENTRO manages the drinking water networks and 7 % of the groundwater sources, while IAGUASANJO manages 94 % of the underground sources including those groundwater sources that are managed by the privatized management units. Regarding

sanitation services, HIDROCENTRO and IGUASANJO carry out projects, execution of works and maintenance of wastewater collection joined networks, as well as wastewater treatment plants such as "Los Guayos".

**Table 2.** Characteristics of the components of the model for the provision of drinking water and sanitation services in the San Joaquin Municipality, Carabobo Stat.

DWSS Service Providers, San Joaquin Municipality	Operator	Management Model	Financing	Regulatory framework	Tariff policies and subsidy systems
Central Hydrological Company (HIDROCENTRO)	Regional Company (Limited)	Direct-Complex Public Management Subsidiary of HIDROVEN	Republic budget. Fee collection system	Organic Law for the Provision of Drinking Water and Sanitation Services. Rate adjustments anchored to the petro, the Ministry of People's Power for Light Industries and Commerce sets the maximum permissible rates for the sector	Subsidy policy and rate design, to be applied by municipalities
Directorate of water and public works (Nov. 2018-July 2020)	Municipal Institution (Limited)	Direct-Simple Public Management	Budget of the Republic assigned to the Mayor's Office	Organic Law for the Provision of Drinking Water and Sanitation Services (LOPSAPS)	not established
Communal Council	Municipal Community Association (Limited)	Controlled by IAGUASANJO	Budget of the Republic assigned to the mayor's office	LOPSAPS, Law of communal councils,	

DWSS Service Providers, San Joaquin Municipality	Operator	Management Model	Financing	Regulatory framework	Tariff policies and subsidy systems
Urbanisms Private Associations	Municipal Associations (interference of provider of service)	Controlled by IAGUASANJO	Own resources, extra condominium fees, mayor's office, government	Internal regulations	Fees paid to the condominium
IAGUASANJO (July 2020)	Company Municipal	Direct-Complex Public Management	Budget of the Republic assigned to the mayor's office	Organic Law for the Provision of Drinking Water and Sanitation Services. Municipal ordinance of creation of the Institute of July 20, 2020.	Adjustments anchored to the petro, the Ministry of People's Power for Light Industries and Commerce sets the maximum permissible rates for the sector

### Creation of DWSS provision indexes in the SJM-CS

Table 3 presents the method for creating the three indexes associated with the provision of drinking water and sanitation services by IAGUASANJO in the SJM-CS derived from the application of Equation (1). The values of the matrix of the Table 3 have been separated into two components, which include the activities for the provision of drinking water and sanitation services.

**Table 3.** Multi-criteria matrix of Drinking Water and Sanitation Services Provision Indexes (IPSAPS) at the IAGUASANJO municipal level during 2019-2021 (I) in the four communes of the San Joaquin Municipality, Carabobo State.

Comp.	variables	Year	IAGUA-SANJO	Relative frequency of DWSS activities in the communes				
				Oro del Pueblo	Centro-Oeste Lago Los Tacariguas	Tacarigua Sur	Carabalí Socialist	
DWS provision	1.1 Rehabilitation/inspection of aqueducts	2019	1	0.2	0.4	0.2	0.1	
		2020	1	0.21	0.5	0.2	0.1	
		2021	1	0.4	0.4	0	0.1	
	Subtotal 1.1			3	0.9	1.3	0.4	0.3
	1.2 Installation of aqueducts	2019	1	0.09	0.6	0.2	0.1	
		2020	1	0.4	0.2	0.2	0.2	
		2021	1	0.7	0.2	0	0.1	
	Subtotal 1.2			3	1.2	1.0	0.4	0.3
	1.3 Deep well services	2019	1	0.2	0.4	0.2	0.2	
		2020	1	0.5	0.1	0	0.4	
		2021	1	0.31	0.5	0.1	0.1	
	Subtotal 1.3			3	1.0	0.9	0.2	0.7
	Subtotal 1			9	3.1	3.3	1.2	1.3
SS Provision	2.1 Cleaning, inspection and reconstruction of embedments	2019	1	0.21	0.23	0.4	0.16	
		2020	1	0.53	0.18	0.28	0.01	
		2021	1	0.57	0.43	0	0	
	Subtotal 2.1			3	1.31	0.84	0.68	0.17

Comp.	variables	Year	IAGUA-SANJO	Relative frequency of DWSS activities in the communes			
				Oro del Pueblo	Centro-Oeste Lago Los Tacariguas	Tacarigua Sur	Carabalí Socialist
2.2	Cleaning and inspection of manholes	2019	1	0.34	0.20	0.32	0.14
		2020	1	0.59	0.23	0.13	0.05
		2021	1	0.43	0.51	0	0.06
Subtotal 2.2			3	1.36	0.94	0.45	0.25
2.3	Rehabilitation of sewage pipes for pipes with a diameter of 6 inches	2019	1	0	0	1	0
		2020	1	1	0	0	0
		2021	1	1	0	0	0
Subtotal 2.3			3	1	2	3	4
2.4	Rehabilitation of sewage pipes for pipes with a diameter of 8 inches	2019	1	0.22	0.48	0.17	0.13
		2020	1	0.71	0.06	0.21	0.02
		2021	1	0.87	0.13	0	0
Subtotal 2.4			3	1.8	0.67	0.38	0.15
2.5	Rehabilitation of sewage pipes for 12-inch diameter pipes	2019	1	0	0	1	0
		2020	1	0	0	1	0
		2021	1	0	1	0	0
Subtotal 2.5			3	0	1	2	0
2.6	Rehabilitation of sewage pipes for pipes with a diameter of 21 inches	2019	0	0	0	0	0
		2020	1	1	0	0	0
		2021	1	0	1	0	0
Subtotal 2.6			2	1	1	0	0
Subtotal 2			17	7.5	4.5	4.5	0.6

Comp.	variables	Year	IAGUA-SANJO	Relative frequency of DWSS activities in the communes			
				Oro del Pueblo	Centro-Oeste Lago Los Tacariguas	Tacarigua Sur	Carabalí Socialist
Total 1+2			26	11	7.8	5.7	1.9
IMPSA			0.35	0.12	0.13	0.04	0.05
IMSS			0.65	0.29	0.17	0.17	0.02
IMPSAS			1	0.4	0.3	0.2	0.1

Source: Own elaboration. Adaptation of López-Calatayud *et al.* (2022c).

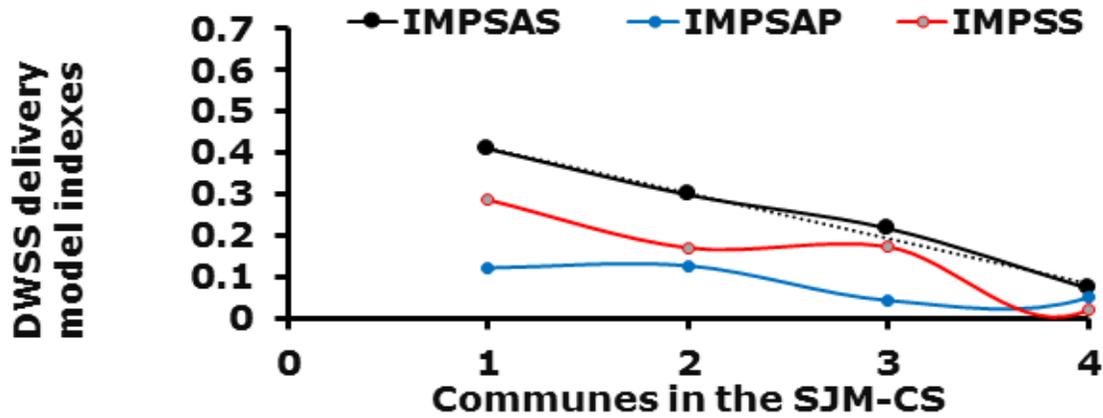
In Table 3, it can be seen that the component associated with the provision of drinking water services encompasses three variables representing the actions carried out by IAGUASANJO in the period 2019-2021, the results of which were presented in Figure 5. The three variables involve the activities of a) rehabilitation/inspection of aqueducts, b) installation of aqueducts and c) services of deep wells. The weights were obtained as the number of actions carried out within each commune divided by the total actions for the four communes of the municipality. The valuation of the subtotal of the actions in provision of drinking water services developed by IAGUASANJO during three years resulted in 9 (Subtotal 1), whose value includes the values for each of the four communes within the San Joaquin Municipality, resulting in a score for commune 1 (Oro del Pueblo) of 3.19, commune 2 (Centro-Oeste Lago Los Tacariguas) of 3.33, commune 3 (Tacarigua Sur) of 1.15 and the Carabalí Socialist commune of 1.33.

Regarding the component associated with the provision of sanitation services, it encompasses six variables representing the actions carried out

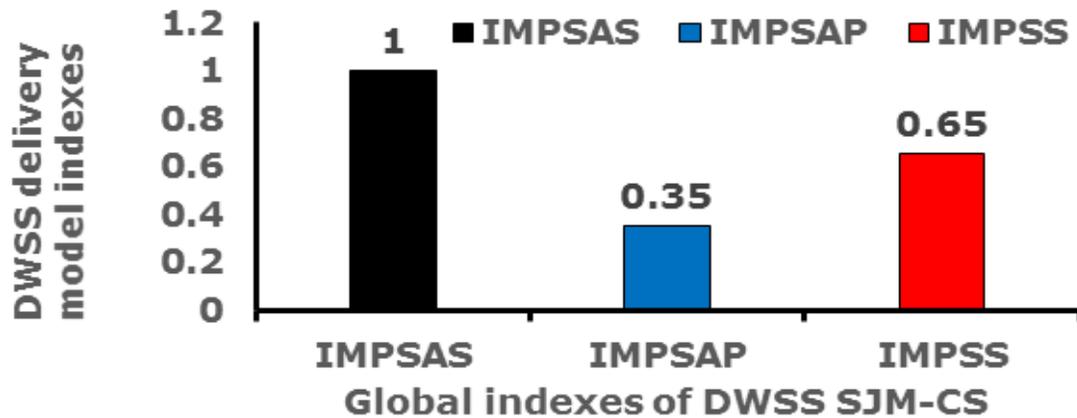
by IAGUASANJO in the period 2018-2021 (Table 3), whose results were presented in Figure 5. The six variables involve the activities of a) cleaning, inspection and reconstruction of embedments, b) cleaning and inspection of manholes, c) rehabilitation of wastewater pipes for 6-inch diameter pipes, d) rehabilitation of wastewater pipes for pipes with a diameter of 8 inches, e) rehabilitation of sewage pipes for pipes with a diameter of 12 inches, and f) rehabilitation of wastewater pipes for pipes with a diameter of 21 inches. The valuation of the subtotal of the actions in provision of sanitation services developed by IAGUASANJO during three years resulted in 17 (Subtotal 2), whose value includes the values for each of the four communes within the Municipality of San Joaquin, resulting in a score for commune 1 (Oro del Pueblo) of 7.47; commune 2 (Centro-Oeste Lago Los Tacariguas) of 4.45; commune 3 (Tacarigua Sur) of 4.51, and the Carabalí Socialist commune of 0.57. The results of the three indexes found for the four communes are shown in Table 3, where it is observed with respect to the drinking water service delivery model index (IMPSAP) that presented the highest score for the Oro del Pueblo commune (0.35) and a lower proportion for the rest of the communes. Regarding the sanitation service delivery model index (IMPSS), it was found that the highest score was obtained for the Oro del Pueblo commune (0.65) and a lower proportion for the rest of the communes. Regarding the global index of the model for the provision of drinking water and sanitation services (IMPSAPS), it was found that it covered a weighting of 0.41 in the Oro del Pueblo commune followed by the index of the Centro-Oeste Lago Los Tacariguas commune (0.30), as well as this for the communes of Tacarigua Sur (0.22) and Socialista Carabalí (0.07). The classification of DWSS indexes on the scales is considered as follows (López-Calatayud *et al.*, 2022c): Very low (0-20 %), low (20-40 %),

medium (40-60 %), high (60-80 %), and very high (80-100 %). In this study, a high value was found for the IMPSS (65 %), and a low value for the IMPSAP (low: 35 %). Figures 6a-6b show the graphical representation of the three indexes, IMPSAP, IMPSS and IMPSAPS, calculated on the basis of a 3-year period (2019-2021) and discriminated for the four communes of the San Joaquin Municipality. Carabobo State, where it is observed that the IMPSAP was lower than the IMPSS, and the complement of both indexes justify the values obtained for the IMPSAPS index. With respect to the global indexes by the SJM-CS, it is observed that 65 % of the activities developed by the IAGUASANJO in the SJM-CS were oriented towards covering the needs of sanitation services, while 35 % of the actions were carried out in drinking water services (Figure 6). At global scale, the most approximated indexes to the IMPSAP, IMPSS and IMPSAPS, are related to the coverage of the drinking water and sanitation services in terms of population supplied. For Europe EUREAU (2020), in the United Kingdom, the public delegated management has achieved an index of coverage of drinking water and sanitation services in the order of 100 % of the population supplied, while in countries such as Austria, Denmark, Italy, Portugal, Spain, France, Germany, the direct public management has achieved coverage of drinking water and sanitation services between high (100 %) for the first four and medium to low (10-60 %) for the rest of the countries. For Latin America, Ferro (2017) reported that 67 % of the companies cover over 60 % of the DWSS.

a)



b)



**Figure 6.** Model indexes for the provision of drinking water and sanitation services in communes of the San Joaquín Municipality by IAGUASANJO in the period 2019-2021. Communes: 1: Oro del Pueblo, 2: Centro-Oeste Lago Los Tacariguas, 3: Tacarigua Sur, 4: Socialista Carabalí. Adapted from López-Calatayud *et al.* (2022c).

## Conclusions

In this study, the experiences of DWSS management model in the San Joaquin Municipality (SJM), Carabobo State (CS), were made up of direct-complex public management represented by the San Joaquin Water Autonomous Municipal Institute (IAGUASANJO, in Spanish) affiliated to the SJM-CS mayor's office, and the Central Hydrological Company (HIDROCENTRO) belonging to Hydrological Company of Venezuela (HIDROVEN, in Spanish). The institutional reform was based on the horizontal structure of the DWSS industry, where the processes of capture, storage in artificial water reservoirs, treatment and distribution of the drinking water obtained from the water surface source as well as the collection and treatment of the wastewaters are performed by the regional company (HIDROCENTRO) and IAGUASANJO has been complying a type of joint work to rehabilitate, maintain, extend the DWSS, with a special emphasis in a sustainable use of the SJM-CS aquifer as a water source to satisfy the need of an important fraction of the inhabitants within the SJM-CS, all these actions within the frame of the municipal transferring process from regional company to the municipal institution in compliance with the national DWSS regulation.

The provision model of the drinking water and sanitation services (DWSS) in the San Joaquin Municipality (SJM), Carabobo state (CS), Bolivarian Republic of Venezuela is a type of direct-complex public management model represented by a horizontalized structure counting with the participation of public companies-delegates in the representations of the Central Hydrological Company (HIDROCENTRO) and the San Joaquin Water Municipal Autonomous Institute (IAGUASANJO). Under this model, IAGUASANJO manages the DWSS

provision for the community councils, private associations (urban planning condominiums) and industries that make up the territorial activities in the municipality. From its creation in 2020 to the present, IAGUASANJO has followed an perfect alignment with the Sustainable Development Goals in the frame of the Agenda 2030 established by United Nations, which has been focused the DWSS provision carrying out the actions to strength the maintenance, and rehabilitation of the existing drinking water pipe network systems that extract the resource from surface and underground water sources and the existing wastewater collection systems, which have reached more than 30 years offering the services for SJM-CS communities as well as the creation of new drinking water and sanitation systems to extend the services, improving the DWSS provision quality by guarantying pressure, continuity and water quality in the DWS, and a suitable sanitary solution to protect the water resources and the environment, which contributes to enhance the life quality of the SJM-CS citizens. The model for the DWSS provision in SJM-CS was represented by the evaluation of several water quality management indexes with approaches for human consumption and water for agricultural irrigation where excellent results were found, demonstrating the favorable levels of the physicochemical characteristics of the groundwaters from SJM-CS aquifer, constituting a safe water source to cover the demand required by the inhabitants of the SJM-CS. As well, in a specific way, this study has evaluated and proposed three management indexes, involving an index to take into account in an integrated manner to the provision of the drinking water and sanitation services (IMPSAPS), a model index for the provision of drinking water services (IMPSAP) and model index for the provision of sanitation services (IMPSS), according to which the IAGUASANJO has oriented 65 % of the activities towards the

provision of sanitation services and 35 % of the actions towards the provision of drinking water services in the period 2020-2023, leading to validate its actions to significantly improve the DWSS quality.

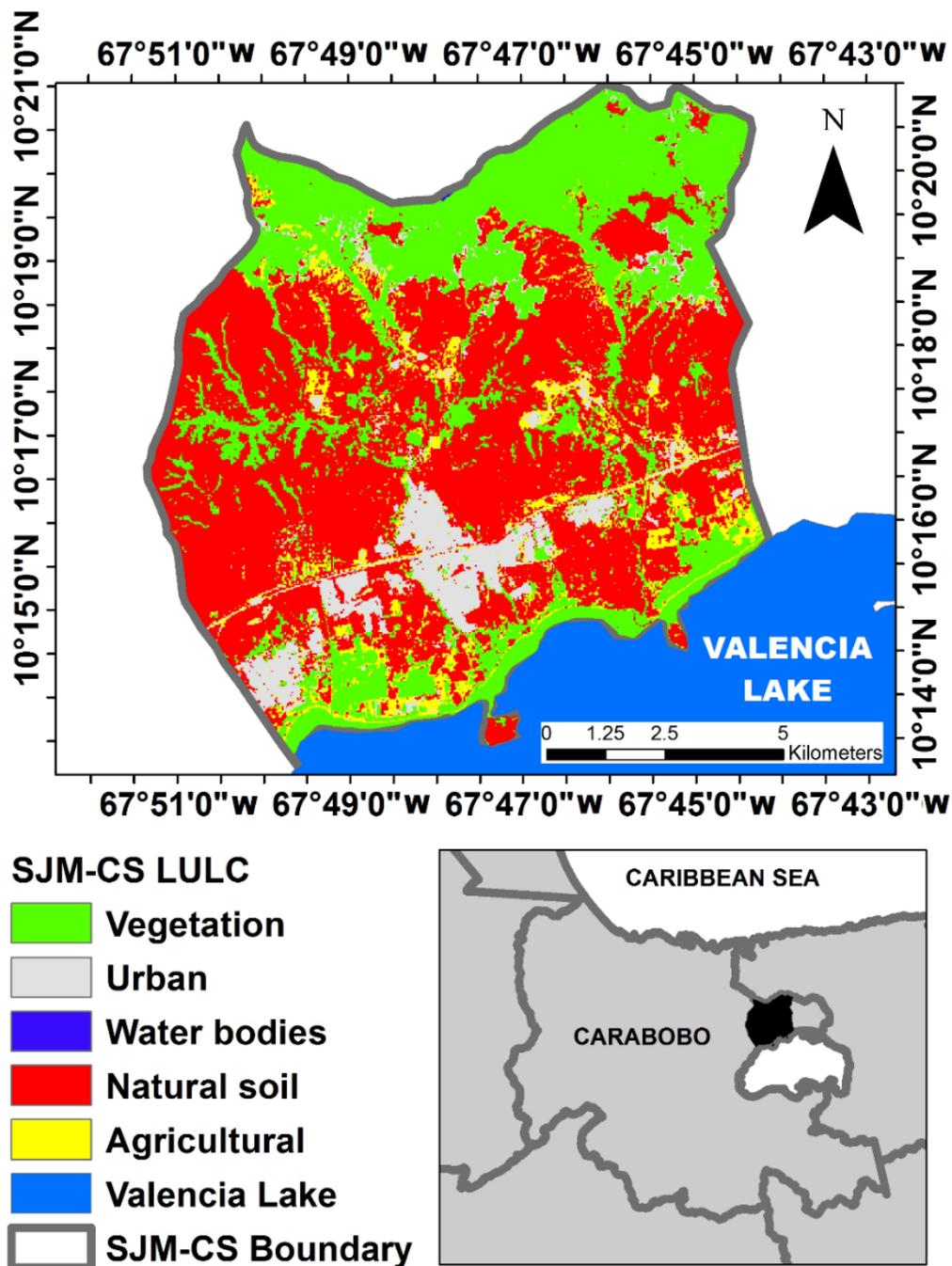
### **Acknowledgements**

It is extended an acknowledgment to the Hidrolab Toro CA Laboratory for its contribution in the water quality determination for the city wells.

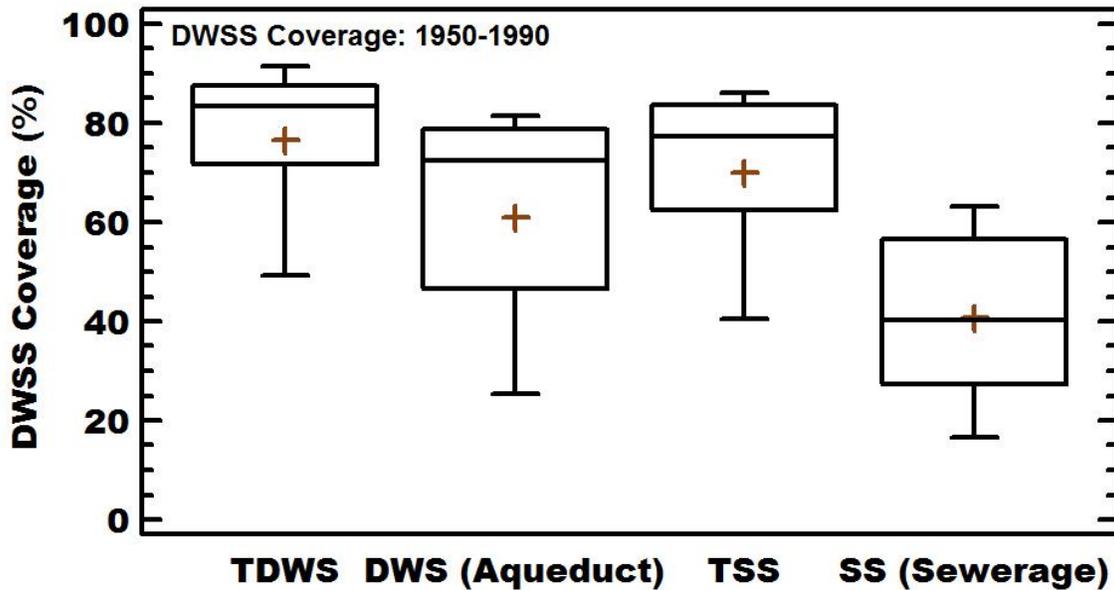
### **Data availability**

All data, models, and code generated or used during the study appear in the submitted article.

## Annex

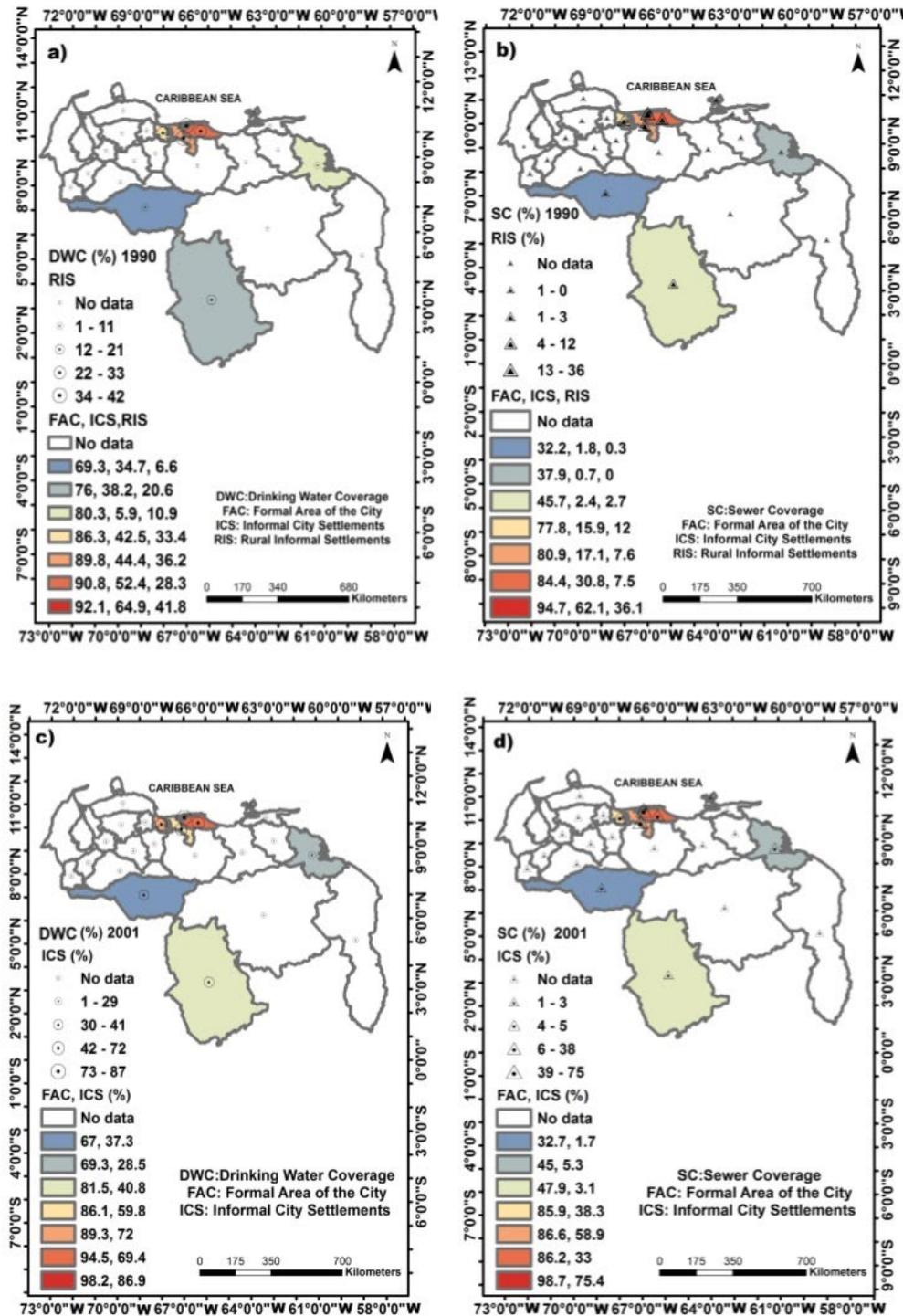


**Figure A1.** Land use and land cover of San Joaquin Municipality, Carabobo state (SJM-CS), Bolivarian Republic of Venezuela.

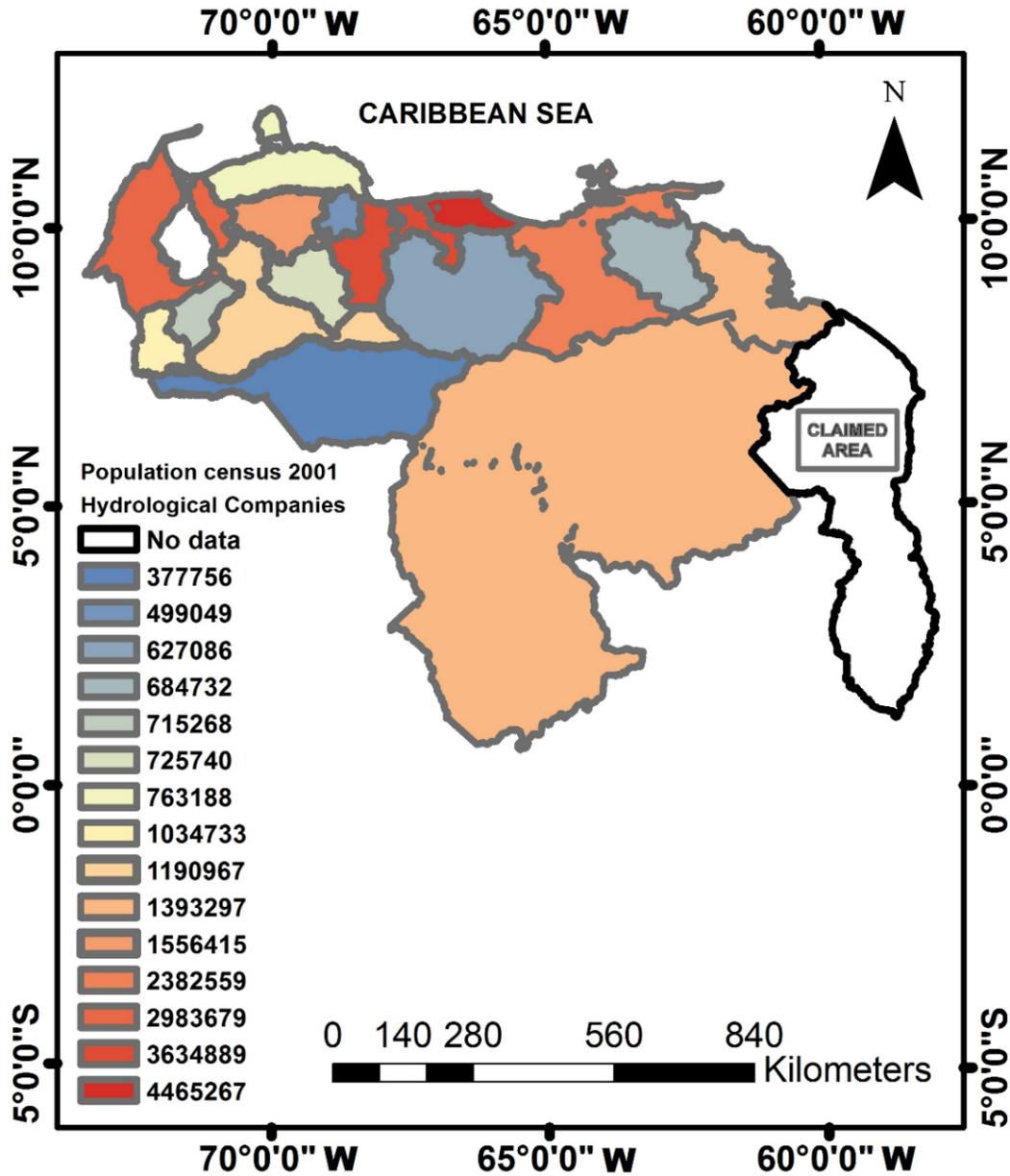


**Figure A2.** Drinking water and sanitation services (DWSS) coverage percentage in Venezuela during the period between 1950 and 1990.

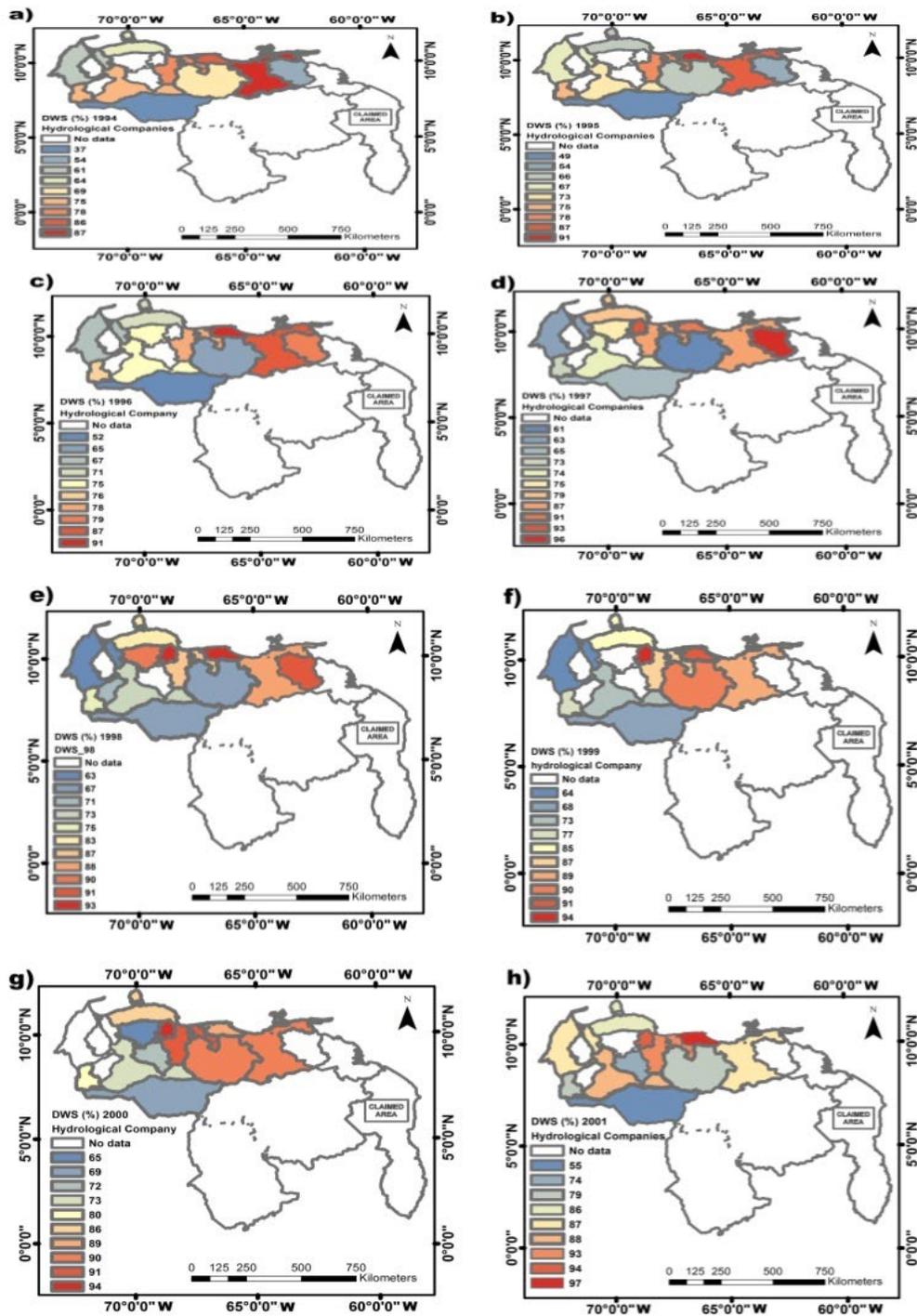
Adapted from Corrales (2004) and OCEI (1996).



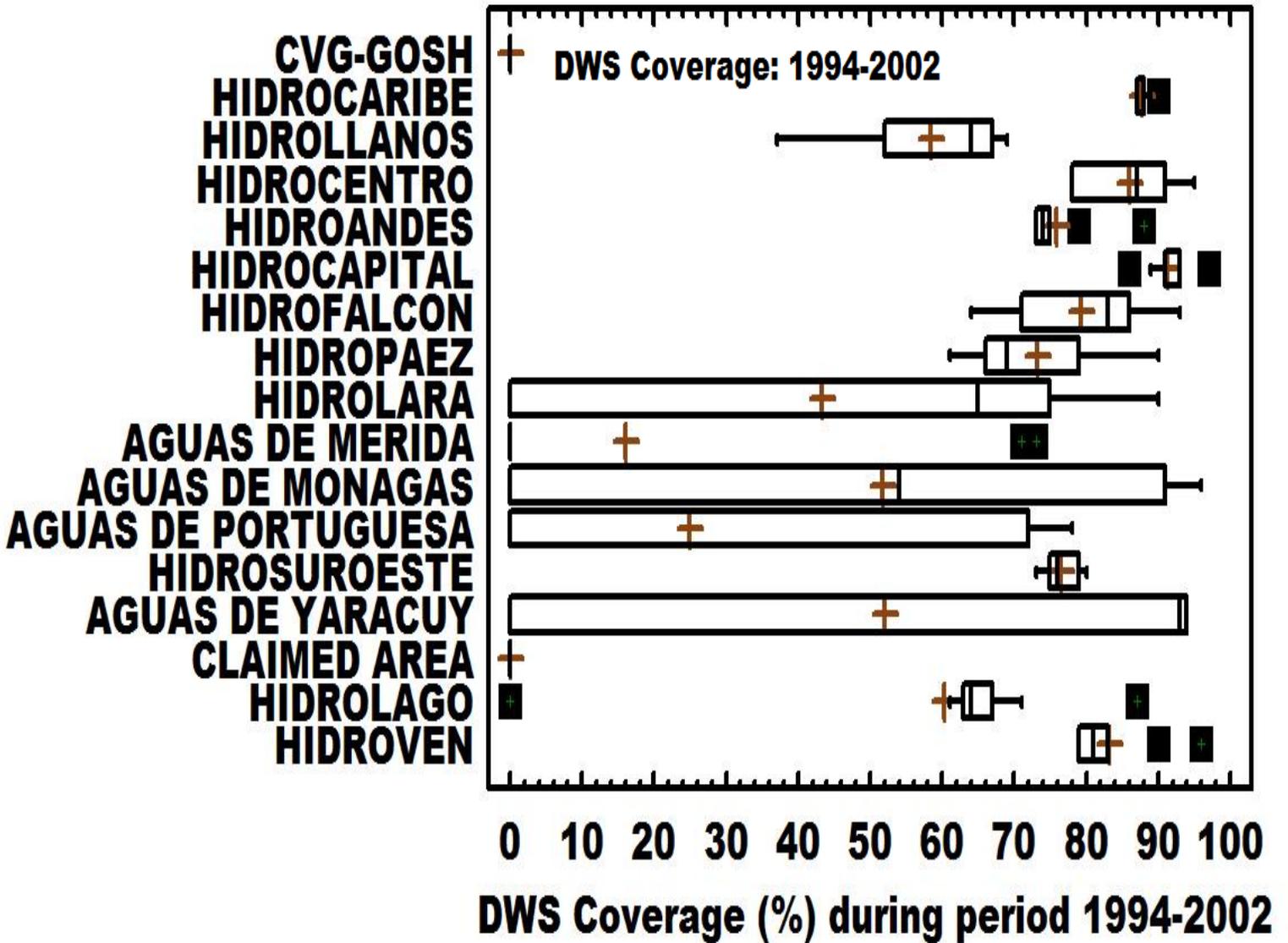
**Figure A3.** Drinking water and sanitation services (DWSS) coverage percentage according to socioeconomic stratum in Venezuela for 1990 and 2001. Adapted from OCEI (1996), INE (2001) and Corrales (2004).



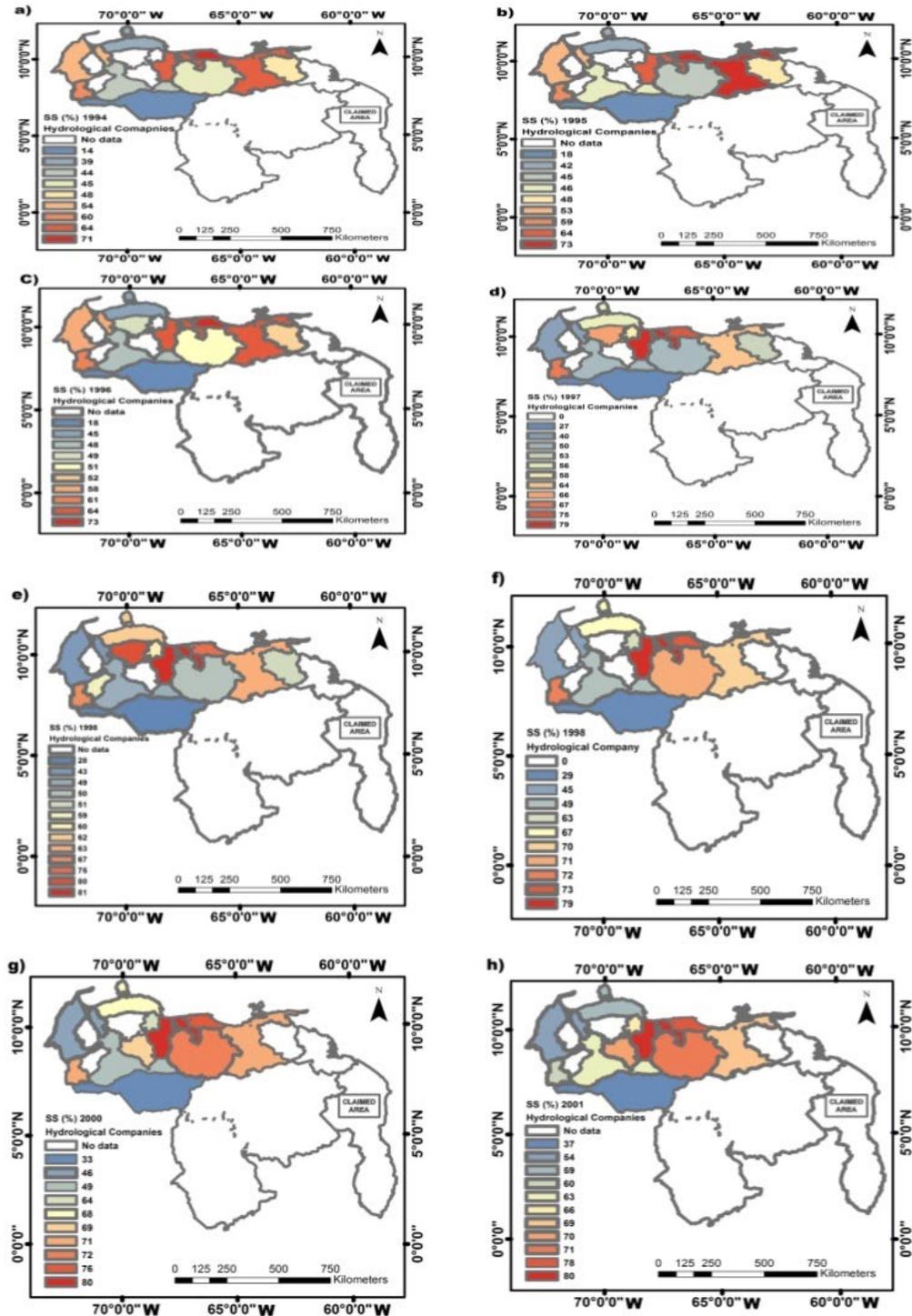
**Figure A4.** Spatial distribution of the censused population by the Venezuelan Hydrological Companies for 2001, whose regional delineations corresponds to the affiliated companies to the Hydrological Company for Venezuela (HIDROVEN) and the decentralized companies in the Bolivarian Republic of Venezuela. Adapted from INE (2001) and Corrales (2004).



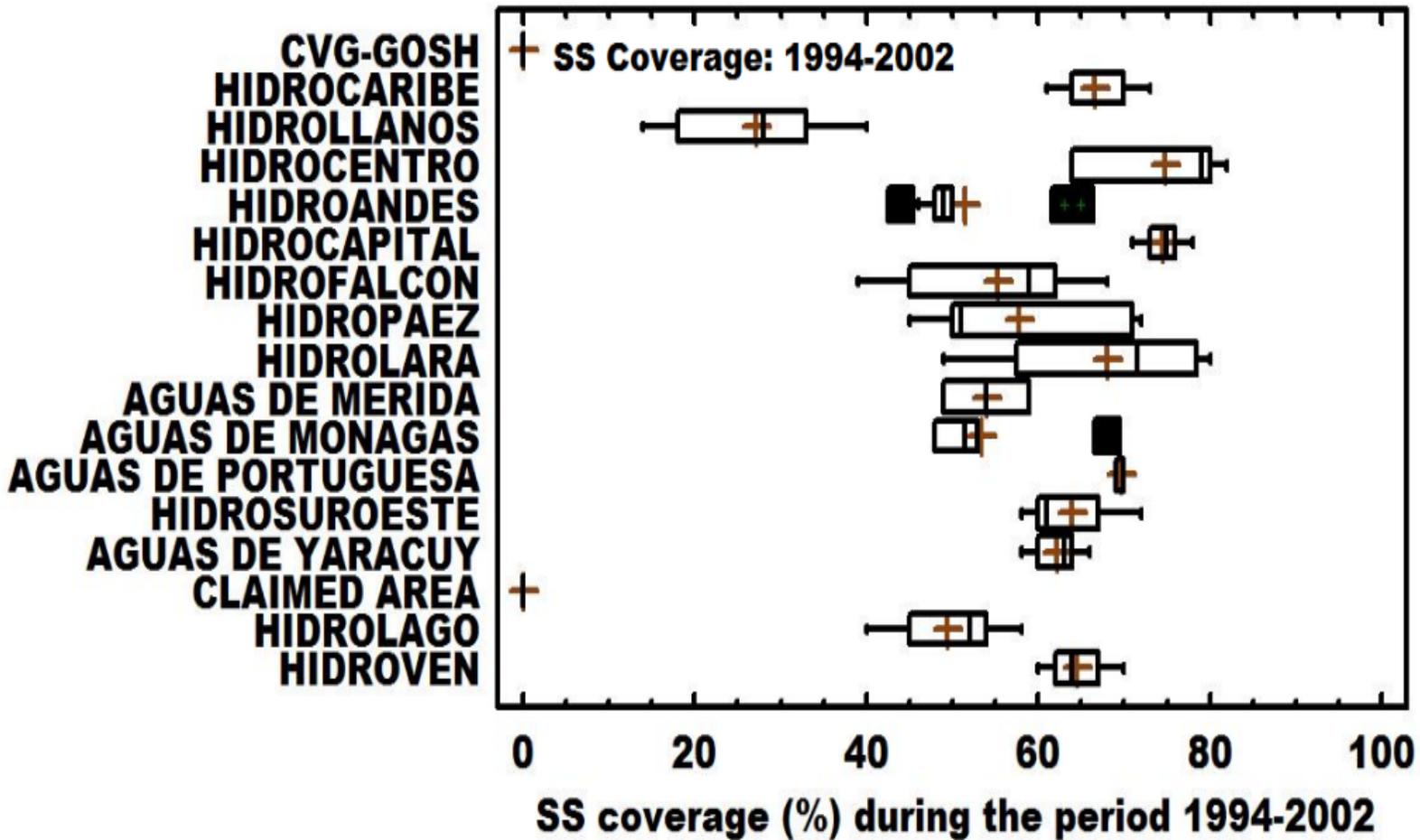
**Figure A5.** Drinking water services from HIDROVEN and decentralized companies during the period 1994-2001. Adapted from HIDROVEN-CAF (2002) and Corrales (2004).



**Figure A6.** Box and whisker diagrams of the drinking water services (DWS) from HIDROVEN and decentralized companies during the period 1994-2002. Adapted from HIDROVEN-CAF (2002) and Corrales (2004).

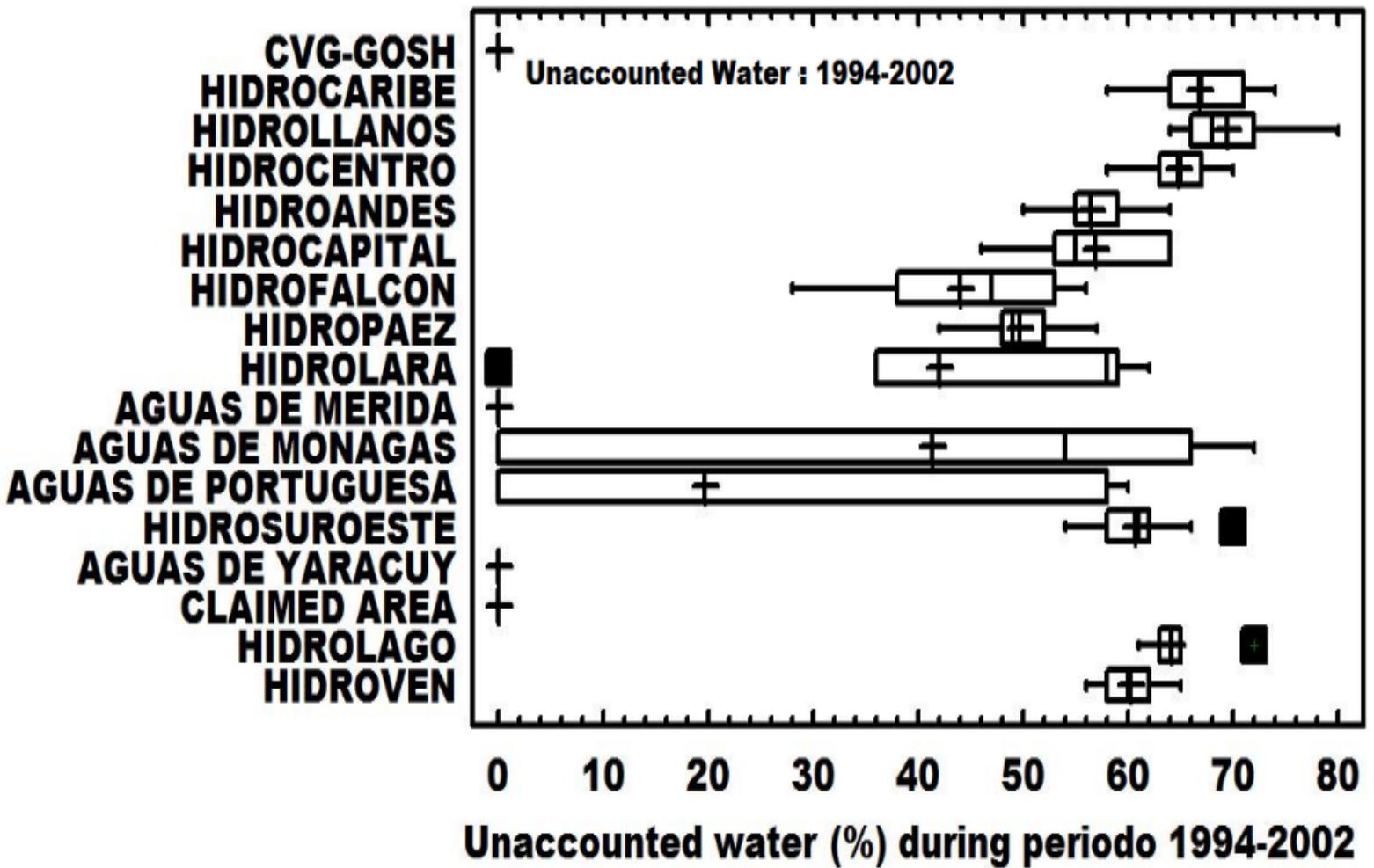


**Figure A7.** Sanitary services from HIDROVEN and decentralized companies during the period 1994-2001. Adapted from HIDROVEN-CAF (2002), Corrales (2004).



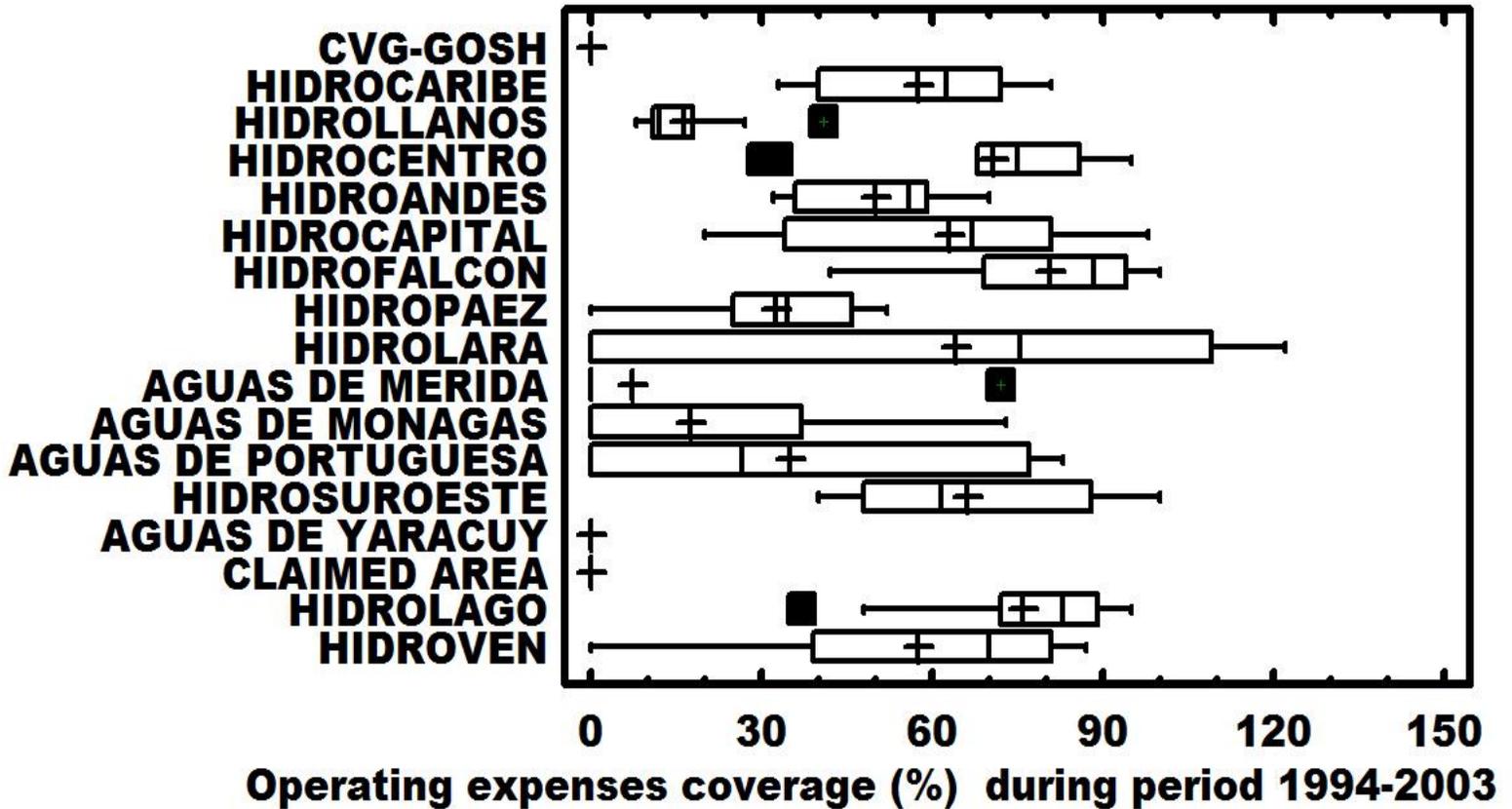
**Figure A8.** Box and whisker diagrams of the sanitary services from HIDROVEN and decentralized companies during the period 1994-2002.

Adapted from HIDROVEN-CAF (2002) and Corrales (2004).



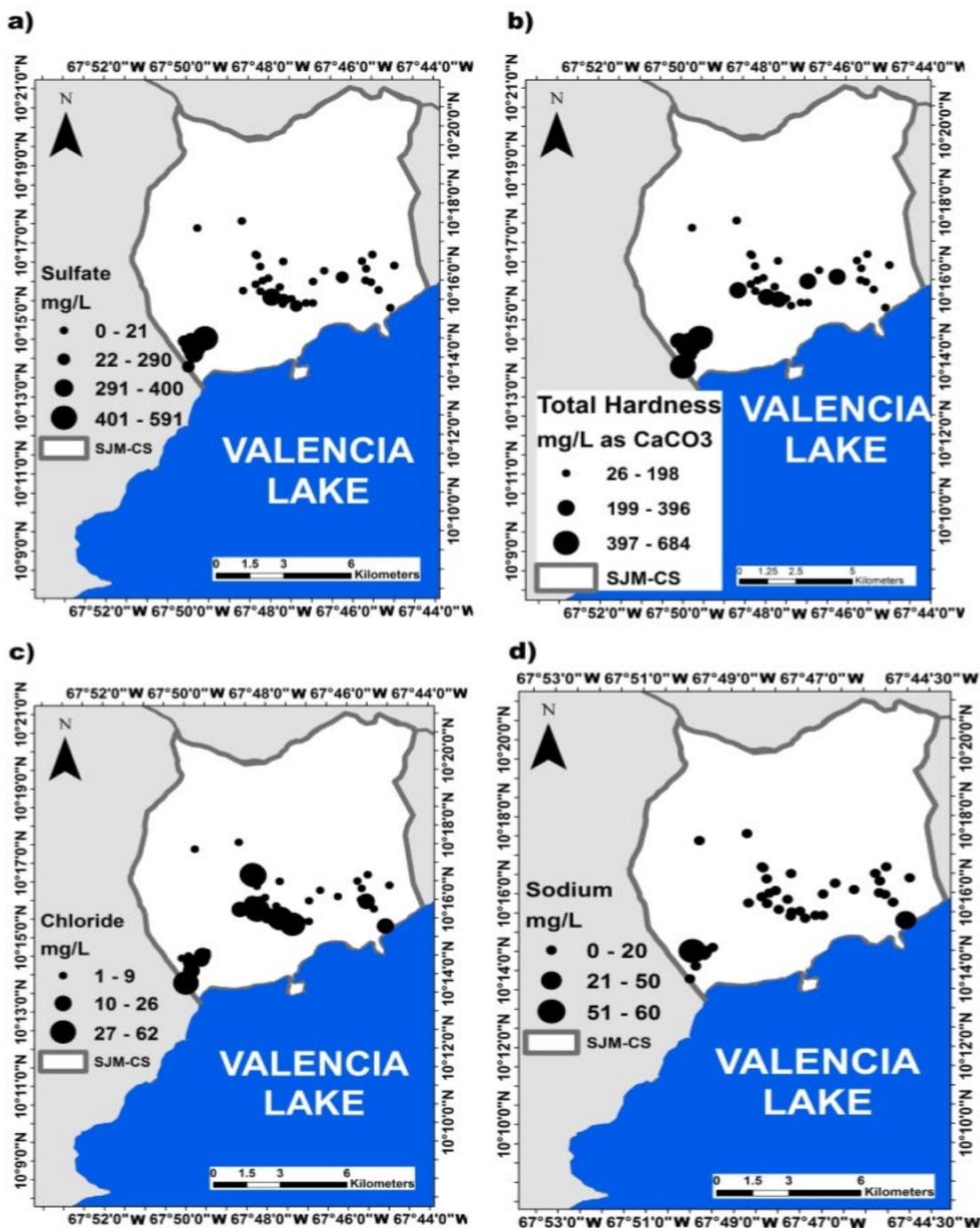
**Figure A9.** Box and whisker diagrams of the unaccounted water from HIDROVEN and decentralized companies during the period 1994-2002.

Adapted from HIDROVEN-CAF (2002) and Corrales (2004).

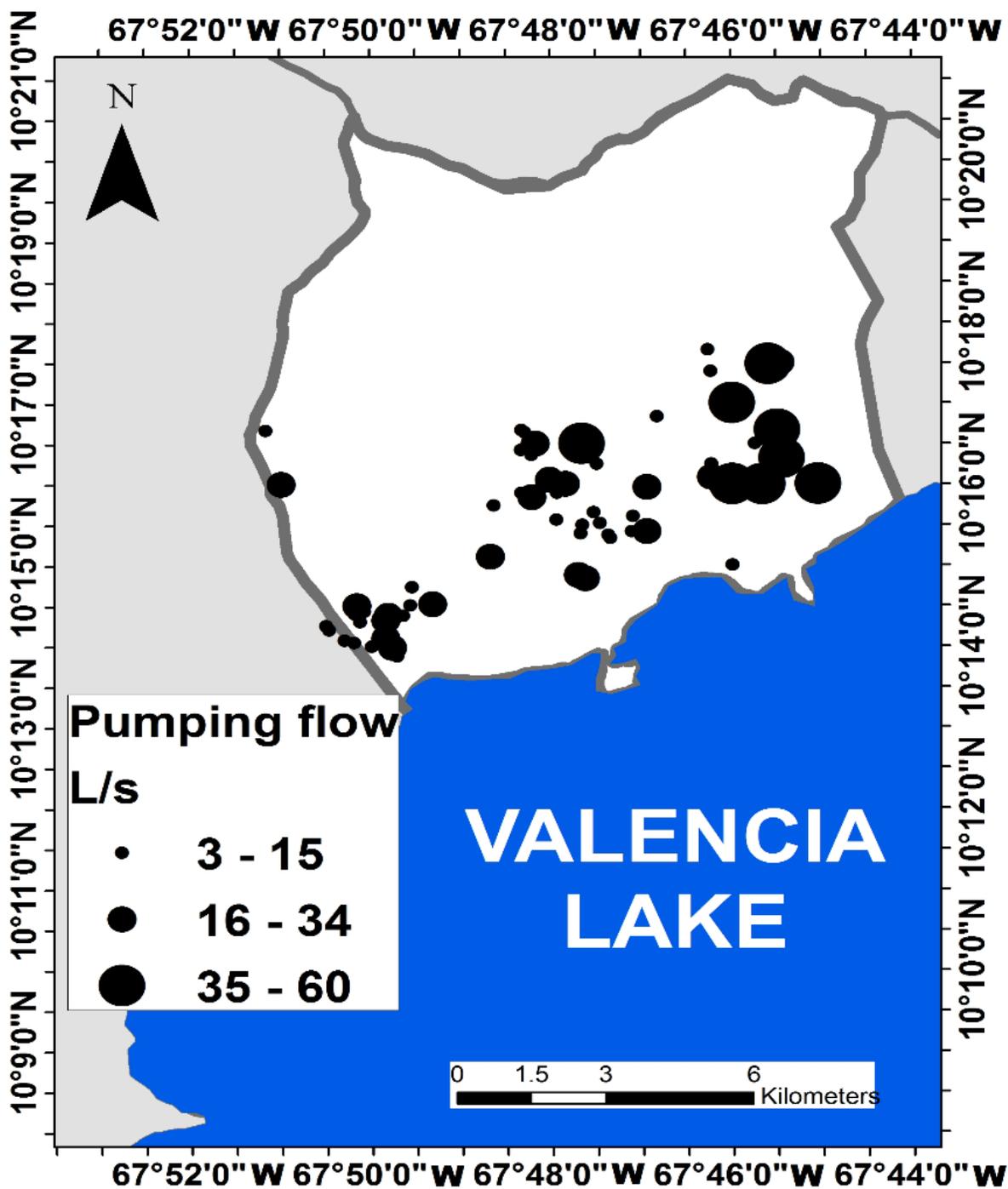


**Figure A10.** Box and whisker diagrams of the operating expenses from HIDROVEN and decentralized companies during the period 1994-2003.

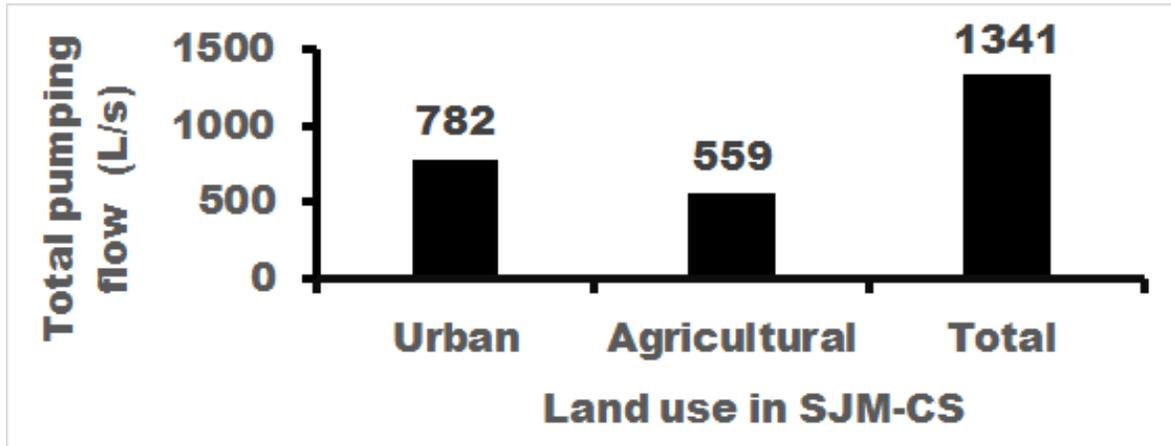
Adapted from HIDROVEN-CAF (2002) and Corrales (2004).



**Figure A11.** Spatial distribution of water quality parameters in groundwaters of wells in SJM-CS during period 1971-2023. Adapted from MINEC and IAGUASANJO (2020), Peraza-Barreto *et al.* (2022), UTAA and IAGUASANJO (2022).



**Figure A12.** Spatial distribution of pumping flow from groundwaters of wells in SJM-CS during period 1971-2023. Adapted from Peraza *et al.* (2021), Peraza-Barreto *et al.* (2022), and IAGUASANJO (2021).



**Figure A13.** Total pumping flow from groundwaters of wells in SJM-CS during period 1971-2022. Adapted from Peraza *et al.* (2021), Peraza-Barreto *et al.* (2022) and IAGUASANJO (2021).

## References

- BCV, Banco Central de Venezuela. (2002). *Anuario de Cuentas Nacionales. Colección Estadística. Diversos años.* Caracas, Venezuela: Banco Central de Venezuela.
- Centro del Agua para América Latina y el Caribe. (marzo, 2012). *Gestión comercial para los organismos operadores de agua, drenaje y saneamiento.* Recovered from <https://es.scribd.com/document/504794913/Curso-Tec-Monterrey>
- CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2009). *Políticas sobre el uso sustentable del agua y la prestación eficiente de los servicios públicos vinculados.* Recovered from <https://es.scribd.com/document/504796336/CURSO-CEPAL>

CODIA & AECID, Conferencia de Directores y Autoridades Iberoamericanas del Agua & Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. (julio, 2012). *Hidrogeología VI. Programa de Formación Iberoamericana en Materia de Aguas*. Recovered from <https://es.scribd.com/document/504795167/HIDROGEOLOGIA>

Corrales, M. E. (2000). *El reto del agua*. Caracas, Venezuela: Editorial Galac, S.A.

Corrales, M. E. (2004). *Venezuela: análisis del sector agua potable y saneamiento*. Recovered from <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/396>

Corrales, M. E. (2008). Infraestructura pública y servicios asociados. En: Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales, Universidad Católica Andrés Bello (eds.). *Acuerdo social. Venezuela: un acuerdo para alcanzar el desarrollo* (pp. 229-262. 572). Recovered from <https://www.ucab.edu.ve/wp-content/uploads/2017/09/INV-IIES-REV-084-Infraestructura-publica-y-servicios-asociados.pdf>

Dunning, D. J., Ross, Q. E., & Merkhofer, M. W. (2000). Multiattribute utility analysis for addressing. Section 316(b) of the clean water act. *Environmental Science & Policy*, 3, 7-14. DOI: 10.1016/S1462-9011(00)00022-8

EUREAU, European Federation of National Associations of Water Services. (2020). *The governance of water services in Europe*. Recovered from <https://www.eureau.org/resources/publications/eureau-publications/5219-the-governance-of-water-services-in-europe-2020-edition/file>

- Ferro, G. (2017). *América Latina y el Caribe hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible en agua y saneamiento: reformas recientes de las políticas sectoriales* (núm. S.17-00195). Recovered from <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/41136>
- Gómez, J. V. (1997). Localización industrial venezolana: municipios y paisajes industriales. *Espacio y Desarrollo*, (9), 311-322. DOI: 10.1075/btl.19.31ind
- Guevara, E. (1990). *Ingeniería de riego y drenaje*. Valencia, Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo.
- Guevara, E., & Cartaya, H. (2004). *Hidrología ambiental*. Valencia, Venezuela: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.
- Guevara, E. (2019). *Modelo de manejo integrado de cuencas*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua. Recovered from <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4302>
- Hajkowicz, S., & Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*, 21, 1553-1566. DOI: 10.1007/s11269-006-9112-5
- HIDROLAB-TORO & IAGUASANJO (2021). Análisis bacteriológicos y fisicoquímicos del agua de seis pozos del Municipio San Joaquín, Estado Carabobo. Valencia, Venezuela: HIDROLAB-TORO-IAGUASANJO. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/504793061/Informe-HIDROLABTORO-Tesis-KL>
- HIDROVEN-CAF. (2002). *Estadísticas de aguas y cloacas*. Caracas, Venezuela: HIDROVEN-CAF.

Huguet-Sierra, G. A., Márquez-Romance, A. M., Guevara-Pérez, E., Pérez-Pacheco, S. A., & Buroz-Castillo, E. (2023a). Calibration and validation of models to estimate the hydraulic parameters of a confined aquifer in a tropical region. *DYNA*, 90(225), 111-121. DOI: 10.15446/dyna.v90n225.106250

Huguet-Sierra, G. A., Márquez-Romance, A. M., Guevara-Pérez, E., Pérez-Pacheco, S. A., & Buroz-Castillo, E. (2023b). Sustainable use of water from a tropical aquifer. *Environmental Quality Management*, 33(1), 257-277. DOI: 10.1002/tqem.22053

INE, National Statistics Institute. (2001). *XIII general census of population and housing*. Recovered from [http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com\\_content&view=category&id=95&Itemid=9#](http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=95&Itemid=9#)

INE, Instituto Nacional de Estadísticas. (2011). *Censo de población y vivienda 2011*. Recovered from <http://www.ine.gov.ve/CENSO2011>

IAGUASANJO, Instituto Autónomo Municipal del Agua de San Joaquín. (2021). *Aval de datos de catastro de pozos y variables de gestión*. Recovered from <https://es.scribd.com/document/504766970/Aval-datos-IAGUASANJO>

López, N., & González, A. (2003). *Diseño de un modelo de organización del sistema de agua potable y saneamiento del estado Carabobo, Venezuela* (tesis de maestría). Universidad de Carabobo. Naganagua, Venezuela.

López, N., Márquez-Romance, A., & Guevara-Pérez, E. (2020). Change dynamics of land-use and land-cover for tropical wetland management. *Water Practice & Technology*, 15(3), 632-644. Recovered from <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.049>

- López-Calatayud, N. C., Márquez-Romance, A. M., & Guevara-Pérez, E. (2021). Spatio-temporal prediction of water balance in the Urama river basin, Venezuela. *DYNA*, 88(217), 58-67. DOI: 10.15446/dyna.v88n217.88222
- López-Calatayud, N., Márquez-Romance, A. M., & Guevara-Pérez, E. (2022a). Wetland management modeling in the frame of Ramsar convention. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 10(4), 296-310. DOI: 10.1080/23249676.2021.1982028
- López-Calatayud, N. C., Márquez-Romance, A. M., Guevara-Pérez, E., & Buroz-Castillo, E. (2022b). An approach for management modeling of a tropical wetland. *Environmental Quality Management*, 31(3), 423-439. DOI: 10.1002/tqem.21798
- López-Calatayud, N. C., Márquez-Romance, A. M., & Guevara-Pérez, E. (2022c). Design of a management model for a tropical wetland. *Environmental Quality Management*, 31(3), 219-231. DOI: 10.1002/tqem.21773
- López-Calatayud, N., Márquez-Romance, A. M., & Guevara-Pérez, E. Pérez-Pacheco, S. A., & Buroz-Castillo, E. (2023). *Management modeling of a tropical wetland*. 1st IAHR International Conference on Global Water Security and 4th International Forum on Water Security and Sustainability. October 29-November 1, Changzhou, Jiangsu.
- Lucena, H., & Álvarez, H. C. (2011). La industria venezolana, auge y ocaso a través de tres modelos productivos. *Ensayos de Economía*, 21(39), 73-90. Recovered from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9018666>

- Lugo, K. Z., Peraza, Y. G., Márquez, A. M., Guevara, E., Pérez, S. A., & Buroz, E. (octubre, 2023). Modelo de prestación de servicios de agua potable y saneamiento a escala municipal en Venezuela. En: Academia Nacional de Ingeniería y Hábitat de Venezuela. *Segundo Simposio Venezolano de Recursos Hídricos*. Academia Nacional de Ingeniería y Hábitat-CIDIAT-ULA. Recovered from [http://web.ula.ve/wp-content/uploads/sites/87/2022/09/Memorias\\_II-Simposio-Venezolano-Recursos-Hidricos-BFinalcorre.pdf](http://web.ula.ve/wp-content/uploads/sites/87/2022/09/Memorias_II-Simposio-Venezolano-Recursos-Hidricos-BFinalcorre.pdf)
- Márquez A., & Carrillo F., V. E. (2015). *Vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del municipio de San Diego, estado Carabobo* (tesis de maestría). Universidad de Carabobo, Naguanagua, Venezuela. Recovered from <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/123456789/2420/1/vcarrillo.pdf>
- Márquez, A., & Peraza, Y. G. (2018). *Análisis de la vulnerabilidad del acuífero del municipio Guacara del estado Carabobo* (tesis de maestría). Universidad de Carabobo, Naguanagua, Venezuela. Recovered from <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/123456789/7664/1/yperaza.pdf>
- Márquez, A. M., Guevara, E., & Rey, D. (2018). Spatio-temporal geostatistical modeling of hydrogeochemical parameters in the San Diego Aquifer, Venezuela. *Journal of Remote Sensing GIS & Technology*, 4(3). Recovered from <http://matjournals.in/index.php/JORSGT/article/view/2799>

- Márquez, A. M., Guevara, E., & Rey, D. (2019a). Hybrid model for forecasting of changes in LULC using satellite techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(1), 252-273. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2885612
- Márquez, A. M., Guevara, E., & Rey, D. (2019b). Soil and groundwater remediation proposal in an aquifer of Venezuela by hydrocarbon transport geostatistical modeling. *Journal of Remote Sensing GIS & Technology*, 5(1). Recovered from <http://matjournals.in/index.php/JORSGT/article/view/2965>
- Márquez, A. M., Guevara, E., Pérez, S., & Rey, D. (2020). Avances de la Universidad de Carabobo en formación de recursos humanos y estudios sobre recursos hídricos. En: Academia Nacional de Ingeniería y Hábitat de Venezuela. *I Simposio Nacional de Recursos Hídricos*. Academia de Ingeniería y Hábitat de Venezuela-CIDIAT-ULA. Recovered from <https://www.youtube.com/watch?v=cR9I-YdWuSE>
- Márquez, A., Freytez, E., Maldonado, J., Guevara, E., Pérez, S., & Buroz, E. (2023). Soil and groundwater remediation proposal for hydrocarbons in a tropical aquifer. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(4), 423-452. DOI: 10.1080/23249676.2022.2089246
- Márquez-Romance, A. M., Farías-de-Márquez, B. E., & Guevara-Pérez, E. (2022a). Land use and land cover change detection using satellite remote sensing techniques in a tropical basin. *Environmental Quality Management*, 31(4), 183-196. DOI: 10.1002/tqem.21802

Márquez-Romance, A., López-Calatayud, N., Fariás-De-Márquez, B., & Guevara-Pérez, E. (2022b). Approach to a new forecasting method of hydrological variables in tropical basins. *Environmental Quality Management*, 31(4), 433-448. DOI: 10.1002/tqem.21829

Márquez-Romance, A. M., Freytez-Boggio, E., Cárdenas-Izaguirre, S. F., Maldonado-Maldonado, J. I., Guevara-Pérez, E., Pérez-Pacheco, S. A., & Buroz-Castillo, E. (2022c). An approach to remediation of a tropical aquifer contaminated with hydrocarbons. *Environmental Quality Management*, 31(4), 357-390. DOI: 10.1002/tqem.21820

Márquez-Romance, A., Freytez-Boggio, E., Maldonado-Maldonado, J., Cárdenas-Izaguirre, S., Pérez-Rodríguez, M., Luque-Mirabal, O., Guevara-Pérez, E., Pérez-Pacheco, S., & Buroz-Castillo, E. (2023). An approach for restoration of the water quality with emphasis on the removal of organochlorine pesticides and eutrophic conditions in tropical rivers. *Environmental Quality Management*, 33(1), 183-202. DOI: 10.1002/tqem.22038

MINEC & IAGUASANJO, Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo & Instituto Autónomo Municipal del Agua de San Joaquín. (2020). *Endorsement of supply of data on deep well coding, lithological profiles and physicochemical parameters in the period 1970-2020*. Recovered from <https://es.scribd.com/document/504766970/Aval-datos-IAGUASANJO>

Municipal Gazette No. 4664. (2020). *Ordinance for the creation of the San Joaquin Municipal Autonomous Water Institute*. Recovered from <https://es.scribd.com/document/504775065/Ordenanza-IAGUASANJO>

National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela. (November 6, 2007a). *Law of Partial Reform of the Organic Law for the Provision of DWSS*. Recovered from [https://asambleanacionalvenezuela.org/leyes/sancionadas/ley\\_de\\_reforma\\_parcial\\_de\\_la\\_ley\\_org%C3%A1nica\\_para\\_la\\_prestaci%C3%B3n\\_de\\_los\\_servicios\\_de\\_agua\\_potable\\_y\\_de\\_saneamiento](https://asambleanacionalvenezuela.org/leyes/sancionadas/ley_de_reforma_parcial_de_la_ley_org%C3%A1nica_para_la_prestaci%C3%B3n_de_los_servicios_de_agua_potable_y_de_saneamiento)

National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela. (2001). *Organic Law for the Provision of Drinking Water and Sanitation Services*. Recovered from <https://consensomontevideo.cepal.org/es/instrumento/ley-organica-de-prestacion-de-servicio-de-agua-potable-y-saneamiento-2001>

National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela. (2007b). *Water Law*. *Official Gazette*, (38), 595. Caracas, Venezuela: National Assembly of the Bolivarian Republic of Venezuela.

OCEI, Oficina Central de Estadística e Informática. (1996). *La OCEI y su información*. Recovered from <http://isbn.cenal.gob.ve/catalogo.php?mode=detalle&nt=42785>

Regulations for the classification and quality control of the waters of the Lake Valencia Basin. (January 13, 1999). *Official Gazette*, (5), 305.

Peraza, Y. G., Lugo, K. Z., Márquez, A. M., Guevara, G. E., Pérez, S. A., & Buroz, E. (2021). Design and evaluation of a model for the provision of drinking water and sanitation services at municipal scale for Venezuela. *Journal of Remote Sensing GIS & Technology*, 7(2). Recovered from <http://matjournals.in/index.php/JORSGT/article/view/6987>

- Peraza-Barreto, Y. G., Lugo-Piña, K. Z., Márquez-Romance, A. M., Guevara-Pérez, E., Pérez-Pacheco, S. A., & Buroz-Castillo, E. (2022). A novel approach to model for the management of drinking water and sanitation services at municipal scale. *Environmental Quality Management*, 32(2), 341-355. DOI: 10.1002/tqem.21851
- Reyes, S. W., & Márquez, A. (2019). *Sustainable management of water resources in the northern zone of the Guacara municipality of Carabobo state* (tesis de maestría). Universidad de Carabobo, Naguanagua, Venezuela. Recovered from <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/123456789/8188/1/sreyses.pdf>
- Sanitary Standards for Drinking Water Quality. (February 13, 1998). *Official Gazette*, (36), 395.
- Tortajada, C. (2020). Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. *NPJ Clean Water*, 3(1), 22. DOI: 10.1038/s41545-020-0069-3
- UN, United Nations. (2023). *Agenda 2030*. Recovered from <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- UTAA & IAGUASANJO, Unidad Territorial de Atención de las Aguas & Instituto Autónomo Municipal del Agua de San Joaquín. (2022). *Water quality evaluation. Laboratory of Ministry of Waters (Report of results)*. Maracay, Venezuela: Unidad Territorial de Atención de las Aguas & Instituto Autónomo Municipal del Agua de San Joaquín.

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-04

Artículos

**Potencial de riesgo a la salud por consumo de agua contaminada con cromo en Zimapán, Hidalgo, México**

**Potential health risk from drinking water contaminated with chromium in Zimapan, Hidalgo, Mexico**

Marco Antonio Sánchez-Olivares<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0660-8028>

Juan Carlos Gaytán-Oyarzun<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3498-0441>

Maritza López-Herrera<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1801-406X>

Alejandra Sarahí Hernández-Lozada<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3554-5508>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, Tuxpan, Veracruz, México, [marcosanchez02@uv.mx](mailto:marcosanchez02@uv.mx)

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México, [jcgaytan@uaeh.edu.mx](mailto:jcgaytan@uaeh.edu.mx)

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México, [maritzal@uaeh.edu.mx](mailto:maritzal@uaeh.edu.mx)

<sup>4</sup>Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México, [he250430@uaeh.edu.mx](mailto:he250430@uaeh.edu.mx)



Autor para correspondencia: Marco Antonio Sánchez-Olivares,  
marcosanchez02@uv.mx

## Resumen

El presente estudio estimó el potencial de riesgo a la salud asociado con la ingesta crónica de cromo (Cr) en agua potable de Zimapán, Hidalgo. Se llevó a cabo el monitoreo de Cr previo y posterior al sistema de potabilización. Para estimar el potencial de riesgo a la salud por consumo de agua con Cr a nivel poblacional, se calculó la ingesta crónica diaria (CDI), el cociente de peligro (HQ), el riesgo de desarrollo de cáncer individual para toda la vida (LCRi) y la incidencia de cáncer (IC) por cada sector poblacional. Se detectó la presencia de Cr tanto en el monitoreo previo y posterior al sistema de potabilización, con una concentración de 0.1 mg/l. Los valores de HQ para los grupos poblacionales de niños, adolescentes y adultos mayores son mayores a 1, esto indica que 17 488 individuos ubicados en estos grupos poblacionales son susceptibles a desarrollar afectaciones a la salud no relacionadas con el cáncer. Asimismo, el LCRi asociado con la exposición a concentraciones de Cr reportadas estimó la probabilidad de desarrollo de cáncer individual en grupos susceptibles como niños, adolescentes y adultos mayores por la ingesta continua y prolongada de agua proveniente del sistema de potabilización.

**Palabras clave:** agua subterránea, cromo, riesgo cancerígeno, salud humana.

## Abstract

The present study estimated the health risk potential associated with chronic chromium (Cr) intake in drinking water of Zimapan, Hidalgo. Cr monitoring was carried out before and after the drinking water treatment system. To estimate the potential for health risk from water consumption with Cr at the population level, the Chronic Daily Intake (CDI), the Hazard Quotient (HQ), the Lifetime Cancer Risk (LCRi) and the Cancer Incidence (IC) were calculated for each population sector. Cr was detected at both pre- and post-treatment monitoring, with a concentration of 0.1 mg/L. HQ values for children, adolescents and older adults are greater than 1, indicating that 17 488 individuals in these population groups are susceptible to developing non-cancer related health conditions. The LCRi associated with exposure to reported Cr concentrations estimated the likelihood of individual cancer development in susceptible groups such as children, adolescents and older adults, by the continuous and prolonged intake of water from drinking water system.

**Keywords:** Groundwater, chromium, carcinogenic risk, human health.

Recibido: 15/07/2024

Aceptado: 15/10/2024

Publicado *ahead of print*: 20/11/2024

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

El cromo (Cr) es un elemento considerado como peligroso y se encuentra entre los ocho metales pesados contaminantes más comunes identificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2010). Este elemento se clasifica como un carcinógeno del grupo 1 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 1990; Sedman *et al.*, 2007). Se puede encontrar en los estados de oxidación [Cr (-II)] a [Cr (+VI)] (Valko, Morris, & Cronin, 2005; Lushchak, Kubrak, Nykorak, Storey, & Lushchak, 2008; USEPA, 2010); en su estado trivalente [Cr (III)] no se considera un contaminante ambiental, mientras que el cromo hexavalente [Cr (VI)] se considera como de riesgo potencial debido a la facilidad de absorción por las células (WHO, 2003; Shaw, Mondal, Bandyopadhyay, & Chattopadhyay, 2019). El cromo es frecuentemente utilizado como tóxico de referencia (OECD, 2004). Estudios epidemiológicos han vinculado la exposición a altos niveles de cromo con una mayor incidencia de cáncer y alteraciones en tejidos y órganos (Begum, Rao, & Srikanth, 2006; Mishra & Mohanty, 2008), efectos en el desarrollo (ATSDR, 2012) y alteraciones en el metabolismo (Oner, Atli, & Canli, 2008).

El Cr está en el ambiente de manera natural en forma mineral y por actividades antrópicas; su presencia en el agua subterránea se atribuye a la erosión del suelo y rocas, o por fuentes de contaminación (Velma, Vutukuru, & Tchounwou, 2009; McNeill, McLean, Parks, & Edwards, 2012). Las aguas subterráneas conforman la principal fuente de abastecimiento de agua en el mundo (Sharma, Petrushevski, & Amy, 2008; SCDB, 2010). En diversos estudios, se ha reportado la presencia de Cr a concentraciones elevadas en fuentes de abastecimiento de origen

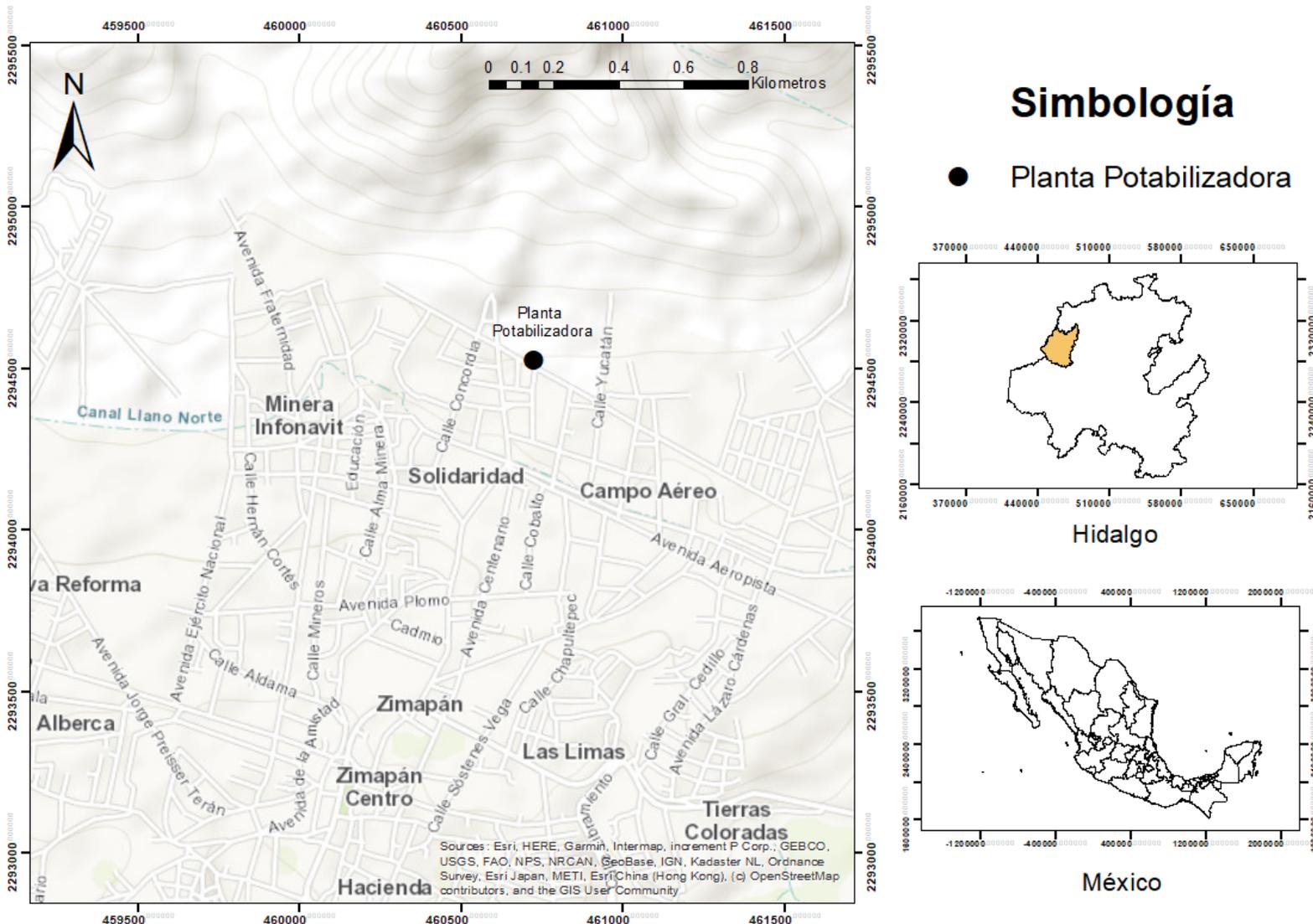
subterráneo, como en la ciudad de León en México (Armienta-Hernández & Rodríguez-Castillo, 1995); California, Washington, Indiana, Carolina del Sur, Carolina del Norte y Nueva Jersey en EUA (USEPA, 2000; USGS, 2004); Ludhiyana, Kanpur y Lucknow en India (Bellander & Peterson, 2002), y Wuhan en China (Li, 2004). Asimismo, se ha evaluado el riesgo potencial a la salud por exposición al Cr total en el agua potable alrededor del mundo (ATSDR, 2012; IPCS, 2013; Haney, 2015; TCEQ, 2015; Thompson *et al.*, 2018). La toxicidad del Cr depende de la especiación química y la ruta de exposición (Mishra & Mohanty, 2008; Sharma *et al.*, 2008). Debido a su toxicidad, la Organización Mundial de la Salud (OMS), recomienda límites permisibles de 0.05 mg/l de Cr presente en el agua destinada para uso y consumo humano (WHO, 2011). La USEPA recomienda un nivel máximo de contaminante para Cr total de 0.1 mg/l (USEPA, 2000). Por su parte, la norma NOM-127 establece un límite máximo permitido de 0.05 mg/l de Cr total presente en el agua para uso y consumo humano (DOF, 2022). Estos valores están basados en datos de toxicidad intestinal procedentes de bioensayos en animales (Ahmed & Mokhtar, 2020). La exposición crónica a concentraciones elevadas de Cr (VI) en el agua potable puede aumentar el riesgo de varios problemas de salud, como cáncer gastrointestinal, daño hepático y renal en casos de exposición prolongada (ATSDR, 2012). Además, algunos de los efectos reportados por agencias internacionales incluyen daños como hiperplasia nodular linfocítica, considerado un precursor no canceroso de la formación tumoral (NTP, 2008). En este contexto, la evaluación de riesgos potenciales a la salud por exposición a contaminantes ambientales adquiere relevancia para llevar a cabo acciones de regulación y formulación de normativas. Con base en las consideraciones anteriores, este trabajo tiene como objetivo estimar el potencial de riesgo a la salud

de la población expuesta por la presencia de concentraciones de Cr en el agua potable de Zimapán, Hidalgo, México.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La ciudad de Zimapán se localiza entre los paralelos 20° 39' y 20° 58' de latitud norte y los meridianos 99° 11' y 99° 33' de longitud oeste, en la región occidente del estado de Hidalgo, México (Figura 1). De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización en Operación (Conagua, 2015), en el municipio de Zimapán hay tres plantas de potabilización ubicadas en la localidad de Benito Juárez (Detzani), El Muhí y Zimapán-Tanque Central. Este estudio se llevó a cabo en la planta potabilizadora ubicada en el pozo El Muhí "Dra. María Aurora Armienta Hernández". Se realizó el monitoreo de entrada y salida del proceso de remoción y la variabilidad mensual de marzo de 2019 a febrero de 2020.



**Figura 1.** Localización del área de estudio.

## Preparación y análisis de las muestras

Las muestras de agua se recolectaron de acuerdo con los lineamientos establecidos en la NOM-014-SSA1-1993 (DOF, 1993), que establece los procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, para

su posterior análisis en el Laboratorio de Pruebas Analíticas del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Se tomaron tres alícuotas de 45 ml de muestra tanto en el monitoreo previo como posterior al sistema de potabilización; se adicionaron 5 ml de HNO<sub>3</sub> bidestilado, y fueron digeridos en un horno de microondas marca Questron, modelo Q Wave 1000 de acuerdo con el método de digestión ácida asistida por microondas en muestras acuosas (USEPA, 2007b). Las muestras de agua digeridas y enfriadas se aforaron a un volumen adecuado y el análisis elemental se hizo en un espectrofotómetro de absorción atómica Varian, modelo Spectr AA 880, con límite de detección de 0.01 mg/l para cromo total. Las curvas de calibración para el elemento se realizaron a partir de soluciones estándar de multielementos y/o unielemento de alta pureza IPC Analytic Mixtrure 5 High Purity Std.

## Información poblacional

Se utilizaron las cifras del Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020). Con estos datos poblacionales se calculó que la población total de Zimapán es de 39 927 habitantes y se dividió en cuatro grupos poblacionales: niños (0-12 años), adolescentes (13-18 años), adultos (19-64 años) y adultos mayores ( $\geq$  65 años).

## Estimación de ingesta crónica diaria, cociente de peligro, riesgo de desarrollo de cáncer e incidencia de cáncer

La concentración de ingesta diaria (CDI) se estimó con base en la concentración de cromo en el agua de consumo y las tasas de ingesta diaria de agua potable por cada grupo poblacional (USEPA, 2011), a través de la siguiente fórmula:

$$CDI = \frac{(C)(TI)(DE)}{(BW)(TP)} \quad (1)$$

Donde:

*CDI* = es la concentración de ingesta diaria (mg/kg/d)

*C* = es la concentración de cromo en el agua (mg/l)

*TI* = es la tasa de ingesta diaria de consumo de agua potable (l/d)

*DE* = es la duración de la exposición en años

*BW* = es el peso corporal (kg)

*TP* = es el tiempo promedio de exposición

En donde la TI (tasa de ingesta crónica diaria de agua) para cada grupo poblacional y la dosis de exposición se asumieron de manera conservadora para cada grupo de la siguiente manera: a) niños (0-12 años), 1 litro/niño con peso promedio de 14 kg; b) adolescentes (13-18 años), 1.5 litros/adolescente con peso promedio de 40 kg; c) adultos (19-64 años), 2 litros/adulto con peso promedio de 70 kg, y d) adultos

mayores (> 65 años), 2 litros/adulto con peso promedio de 65 kg (INSP, 2021; USEPA, 2001).

El cociente de peligro (HQ) se calculó a partir de los datos de CDI y la dosis de referencia del cromo (USEPA, 2007a). Los valores de  $HQ \geq 1$  indican efectos adversos no cancerígenos para la salud por la ingesta continua y prolongada de agua. Los datos de la dosis de referencia para el cromo se obtuvieron de la base de datos IRIS (EPA, 2005; USEPA, 2011):

$$HQ = \frac{CDI(\text{mg/kg/d})}{RfD(\text{mg/kg/d})} \quad (2)$$

Donde:

*RfD* = es la dosis de referencia para Cr vía oral (0.003 mg/kg/día) (USEPA, 2010)

El riesgo de desarrollo de cáncer individual durante el tiempo de vida (LCRi) asociado con la ingestión se calculó a partir de los datos de la CDI y el factor pendiente de cáncer (CSF) reportado (USEPA, 2001):

$$LCRi = [CDI (\text{mg/kg/d})] \times [CSF (\text{mg/kg/d})] \quad (3)$$

Donde:

*LCRi* = riesgo de desarrollo de cáncer individual para toda la vida

*CDI* = es la concentración de ingesta diaria (mg/kg/d)

*CSF* = es el factor de pendiente de cáncer para Cr vía oral (0.05 mg/kg/día) (USEPA, 2010)

El rango límite del riesgo de desarrollar cáncer (LCRi) para un individuo es de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$ . La mayoría de las poblaciones altamente expuestas no deben exceder de  $10^{-5}$  niveles de riesgo; sin embargo, si el valor de riesgo de cáncer es mayor de  $10^{-5}$ , entonces hay que tomar medidas para proteger a la población (USEPA, 2001). Del mismo modo, cualquier valor de ( $HQ \geq 1$ ) se debe tomar en consideración para evitar el riesgo no cancerígeno en seres humanos.

La IC (incidencia de cáncer) se estimó multiplicando el riesgo de desarrollo de cáncer de cada grupo poblacional por el número total de individuos por grupo poblacional. El valor obtenido representa un escenario hipotético que se interpreta como el número de casos de cáncer que aparecerían en una población (CEPIS & OPS, 2005):

$$IC = [LCRi \text{ (mg/kg/d) } ] \times PT \quad (4)$$

Donde:

*LCRi* = riesgo de desarrollo de cáncer individual para toda la vida

*PT* = población total por grupo poblacional

## Análisis estadístico

Una vez obtenidos los datos de concentración de cromo total en el agua potable de Zimapán, se realizó un análisis de Kruskal-Wallis para identificar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los meses de muestreo y entre los sitios de muestreo (IBM, 2017).

## Resultados

Se realizaron muestreos mensuales en el agua tanto en el monitoreo previo como posterior al sistema de potabilización. En los 12 meses de muestreo solo se detectó la presencia de cromo total en el agua proveniente del pozo en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio y febrero, con una concentración de 0.1 mg/l; en el agua de suministro se detectó la presencia de cromo total en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y febrero, con una concentración de 0.1 mg/l (Tabla 1); ello demostró la exposición a este elemento por su presencia en el agua de pozo debido a que el cromo total se retiene dentro de la planta de tratamiento, y se manifiesta en el agua de suministro los meses de agosto a noviembre, lo que implica que este elemento estuvo presente en 10 de los 12 meses muestreados. Los valores reportados en ambos sitios están por encima del límite máximo permitido establecido por la NOM-127-SSA1-2021 de 0.05 mg/l para cromo total. En el análisis de Kruskal-Wallis se determinó que existen diferencias significativas en la concentración de cromo total respecto a los meses de muestreo, donde  $H(11, N = 72) = 45.02497$   $p < 0.0001$ . Entre sitios de muestreo no se presentaron diferencias significativas.

**Tabla 1.** Concentración de cromo total en los meses de muestreo analizados (marzo 2019-febrero 2020) expresados en mg/l.

Mes	Concentración mg/l $\pm$ S	
	Pozo	Suministro
Marzo	0.1 $\pm$ 0.01	ND
Abril	0.1 $\pm$ 0.01	0.1 $\pm$ 0.01
Mayo	0.1 $\pm$ 0.01	0.1 $\pm$ 0.01
Junio	0.1 $\pm$ 0.01	0.1 $\pm$ 0.01
Julio	0.1 $\pm$ 0.01	0.1 $\pm$ 0.01
Agosto	ND	0.1 $\pm$ 0.01
Septiembre	ND	0.1 $\pm$ 0.01
Octubre	ND	0.1 $\pm$ 0.01
Noviembre	ND	0.1 $\pm$ 0.01
Diciembre	ND	ND
Enero	ND	ND
Febrero	0.1 $\pm$ 0.01	0.1 $\pm$ 0.01

(S) desviación estándar; (NOM-127) NOM-127-SSA1-2021; (LMP) límite máximo permitido; (OMS) Organización Mundial de la Salud; (ND) no detectado, inferior al límite de detección del equipo.

La población que recibe agua de la planta potabilizadora se estimó en 39 927 habitantes de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). Los valores de HQ para el cromo total (Tabla 2) son mayores a 1 para los grupos poblacionales de niños, adolescentes y adultos mayores. Esto indica que tales grupos son susceptibles a desarrollar afectaciones a la salud no relacionadas con el cáncer (WHO, 2011); se estima que 17 488 individuos se encuentran en estos grupos poblacionales susceptibles. Los riesgos de desarrollo de cáncer individual durante la vida (LCRi) por ingesta de cromo total se utilizaron para estimar la probabilidad que tiene la población de desarrollar cáncer por

exposición al cromo, de los cuales el grupo de niños, adolescentes y adultos mayores presentan la mayor probabilidad de desarrollo de cáncer individual (Tabla 2). A nivel municipal del total poblacional, se presentó una probabilidad de incidencia de cáncer en los grupos de niños y adultos con valores de 3.2074 y 3.1414, respectivamente.

**Tabla 2.** Estimación de ingesta crónica diaria, riesgo no cancerígeno, riesgo de desarrollo de cáncer durante el tiempo de vida en la población expuesta al cromo total en el agua e incidencia de cáncer.

Grupo poblacional	Habitantes	% poblacional	CDI (mg/kg/día)	HQ	LCRi (mg/kg/día)	IC
Niños	9 164	22.95	0.007	2.33	$3.5 \times 10^{-4}$	3.2074
Adolescentes	4 330	10.84	0.0037	1.23	$1.85 \times 10^{-4}$	0.8010
Adultos	22 439	56.21	0.0028	0.93	$1.4 \times 10^{-4}$	3.1414
Adultos mayores	3 994	10	0.0030	1.00	$1.5 \times 10^{-4}$	0.5991
<b>Total</b>	<b>39 927</b>	<b>100</b>				

(CDI) ingesta crónica diaria; (HQ) riesgo no cancerígeno; (LCR) riesgo de desarrollo de cáncer; (IC) incidencia de cáncer.

## Discusión

Mundialmente se ha investigado sobre los principales efectos en la salud por consumo de agua contaminada con metales pesados (Mendoza-Cano *et al.*, 2015; Chebeir, Chen, & Liu, 2016; Naz, Mishra, & Gupta, 2016). Inclusive la mayor parte de la mortalidad y morbilidad está asociada con enfermedades ocasionadas por el consumo de agua contaminada con sustancias como el cromo (Nadeem, Aslam, Haque, Badar, & Mughal, 2009). Sin embargo, aunque los estudios epidemiológicos no apoyan los efectos directos del contenido de cromo total en el agua de consumo, se

ha comprobado que el consumo continuo de agua con una concentración superior a 0.025 mg/l representa un riesgo significativo en términos toxicológicos (NTP, 2008). Autores como Ahmed y Mokhtar (2020), y Nadeem *et al.* (2009) sugieren que los valores establecidos por la OMS de 0.5 mg/l son concentraciones máximas aceptadas, y la cantidad que excede el límite puede resultar en toxicidad crónica por ingesta continua.

En la determinación de cromo total en el agua potable de Zimapán, los resultados arrojaron que, para los 12 meses de muestreo, se detectó su presencia tanto en el agua del pozo como en el agua de suministro con una concentración de 0.1 mg/l, dicho valor está por encima del límite máximo permitido (LMP) establecido por la NOM-127-SSA1-2021 y la OMS, el cual es de 0.05 mg/l de cromo total. Anteriormente, Pérez-Moreno (2004) reportó para el pozo El Muhí una concentración de cromo total de 0.006 mg/l.

El cromo total se presentó en el agua proveniente del pozo en los primeros cinco meses de muestreo (marzo-julio), y de manera simultánea en el agua de suministro; asimismo, el cromo total continuó afectando la planta durante los cuatro meses posteriores. Para diciembre y enero, el agua de Zimapán estuvo libre de contaminación, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos por la NOM-127; sin embargo, para febrero, de nueva cuenta se presentó la concentración de cromo total para ambos sitios, de tal manera que existe una contaminación simultánea entre el pozo y el agua de suministro. En reportes previos de la zona se ha detectado la presencia de arsénico, cadmio, plomo y mercurio en el agua proveniente de los pozos del municipio de Zimapán. Sin embargo, en este estudio, en los 12 meses de muestreo, no se detectó la presencia de dichos elementos, pues se encontraban por debajo del límite de detección del equipo. Una posible hipótesis para la ausencia de estos

elementos en el monitoreo anual podría explicarse por la falta de precipitaciones en la zona, que al ser escasas no permiten que los acuíferos alcancen su capacidad máxima, y por consiguiente el contacto con algunos yacimientos minerales evita su contaminación. Pérez-Moreno (2004) establece que para el pozo El Muhí existen variaciones estacionales dependientes de los periodos de lluvias y estiaje, lo cual coincide con la ausencia de otros elementos en los sitios analizados. La presencia del cromo en el agua se atribuye al contacto con yacimientos minerales; aunado a esto, las condiciones fisicoquímicas del agua del pozo permiten la solubilidad del metal y favorecen su presencia.

En el pozo El Muhí está la planta potabilizadora con una infraestructura equipada para un sistema de potabilización por el proceso de coagulación-floculación y un tren de tratamiento de 16 pasos (Conagua, 2015). La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011), menciona que el proceso tiene una efectividad por encima del 96 % de remoción en conjunto con procesos como filtración, floculación y cloración; aunque la OMS (WHO, 2011) sugiere la aplicación de estos métodos en conjunto para lograr una eficiencia en la remoción de elementos contaminantes como arsénico y flúor, se pueden presentar situaciones de emergencia, como la presencia de otros elementos contaminantes, para los que una planta potabilizadora no esté preparada. Esto se traduce como un área de oportunidad de mejora con la posibilidad de crear planes y estrategias que respondan a las problemáticas actuales de contingencia ante la presencia de otros elementos contaminantes que pongan en riesgo la salud de la población.

En el sitio de estudio, la exposición al cromo total podría ser la causa de parte de los problemas de salud relacionados con la ingesta de agua contaminada. Sin embargo, para llevar un control de los efectos

ocasionados por la exposición al agua contaminada, se requiere de mediciones precisas mediante un sistema de registro de síntomas y estudios epidemiológicos por parte del sector salud, cada uno con el objetivo de estimar la incidencia de padecimientos o afectaciones vinculadas con la ingesta de cromo total proveniente de aguas subterráneas. Con esto se podrá cuantificar el problema para asignar recursos, e implementar políticas públicas y de regulación para proteger la salud del sector expuesto.

La población vulnerable a la presencia de cromo total en el agua son los grupos conformados por niños, adolescentes y adultos mayores ( $HQ > 1$ ), puesto que la concentración de cromo total reportada podría ocasionar afectaciones adversas a la salud en al menos estos sectores poblacionales. Estos grupos representan el 43.79% de la población municipal de acuerdo con el censo poblacional (INEGI, 2020).

La probabilidad de riesgo de desarrollo de cáncer fue mayor en niños y adultos en comparación con adolescentes y adultos mayores; ambos grupos están potencialmente en riesgo de desarrollar algún tipo de cáncer asociado con el consumo crónico de cromo total, por lo que su protección deberá ser prioritaria dentro del desarrollo de políticas en materia de salud pública que se implementen para mitigar esta problemática.

## Conclusiones

El cromo total se presentó tanto en el monitoreo previo como posterior al sistema de potabilización con una concentración de 0.1 mg/l con algunas ausencias entre los meses de muestreo. Dicho valor está por encima del LMP establecido por la norma oficial mexicana y la Organización Mundial de la Salud, lo cual originó que el factor de riesgo se incrementara en la

estimación de probabilidad de riesgo, por lo que sería conveniente evaluar el impacto ocasionado a la salud por consumo crónico de cromo total.

### Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

### Referencias

- Ahmed, M. F., & Mokhtar, M. B. (2020). Assessing cadmium and chromium concentrations in drinking water to predict health risk in Malaysia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 2966. DOI: 10.3390/ijerph17082966
- Armienta-Hernández, M., & Rodríguez-Castillo, R. (1995). Environmental exposure to chromium in the Valley of León, Mexico. *Environmental Health Perspectives*, 103(1), 47-51. DOI: 10.1289/ehp.103-1519325
- ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). *Toxicological profiles for chromium*. Atlanta, USA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. Recuperado de <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp7.pdf>
- Begum, G., Rao, J. V., & Srikanth, K. (2006). Oxidative stress and changes in locomotor behavior and gill morphology of *Gambusia affinis* exposed to chromium. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 88, 355-365. DOI: 10.1080/02772240600635985
- Bellander, F., & Peterson, H. (2002). *A minor field study of groundwater contamination at Ludhiana, India*. Recuperado de <http://epubl.luth.se/1402-1617/2002/002/>

CEPIS & OPS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente & Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Curso de autoinstrucción. Obtenido de evaluación de riesgo asociado con Contaminantes de Aire*. Recuperado de [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_riesgoaire/lecciones/leccion2d.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_riesgoaire/lecciones/leccion2d.html)

Chebeir, M., Chen, G., & Liu, H. (2016). Emerging investigators series: Frontier review: Occurrence and speciation of chromium in drinking water distribution systems. *Environmental Science & Technology*, 2, 906-914. DOI: 10.1021/acs.est.7b06013

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). *Inventario Nacional de Plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (1993). *Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados*. Recuperado de [chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.comapareynosa.gob.mx/resources/other/reglamentos/NOM-014-SSA1-1993.pdf](https://www.comapareynosa.gob.mx/resources/other/reglamentos/NOM-014-SSA1-1993.pdf)

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2022). *NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Recuperado de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0)

- EPA, Environmental Protection Agency. (2005). *Integrated Risk Information System (IRIS)*. Washington, DC, USA: Environmental Protection Agency. Recuperado de [https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference\\_id/6324329](https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/6324329)
- Haney, J. J. (2015). Consideration of non-linear, non-threshold and threshold approaches for assessing the carcinogenicity of oral exposure to hexavalent chromium. *Regulatory Toxicology Pharmacology*, 73(3), 834. DOI: 10.1016/j.yrtph.2015.10.011.
- IARC, International Agency for Research on Cancer. (1990). Chromium, nickel, and welding. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans*, 49, 1-648.
- IBM, International Business Machines Corporation. (2017). *IBM SPSS for Windows. Version 25.0*. Armonk, USA: International Business Machines Corporation.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de población y vivienda Hidalgo*. Aguascalientes, México: INEGI, 2020.
- INSP, Instituto Nacional de Salud Pública. (2021). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2020 sobre Covid-19 Resultados Nacionales. Cuernavaca, México: Instituto Nacional de Salud Pública.
- IPCS, International Programme on Chemical Safety. (2013). *Inorganic chromium(VI) compounds*. Concise International Chemical Assessment Document 78. International Programme on Chemical Safety, World Health Organization, Geneva. Recuperado de [https://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad\\_78.pdf](https://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad_78.pdf)

- Li, Y. (2004). *Study on chromium contaminated soils and waters around a chromate factory. Heavy metals poster session*. Amherst, USA: University of Massachusetts.
- Lushchak, O. V., Kubrak, O. I., Nykorak, M. Z., Storey, K. B., & Lushchak, V. I. (2008). The effect of potassium dichromate on free radical processes in goldfish: Possible protective role of glutathione. *Aquatic Toxicology*, 87, 108-114. DOI: 10.1016/j.aquatox.2008.01.007
- McNeill, L. S., McLean, J. E., Parks, J. L., & Edwards, M. (2012). Hexavalent chromium review, part 2: Chemistry, occurrence, and treatment. *Journal AWWA*, 104, 7:E395-405. DOI: 10.5942/jawwa.2012.104.0092
- Mendoza-Cano, O., Sánchez-Piña, R. A., Barrón-Quintana, J., Cuevas-Arellano, H. B., Escalante-Minakata, P., & Solano-Barajas, R. (2015). Riesgos potenciales a la salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *Salud Pública de México*, 59(1), 34-40. DOI: 10.21149/8413
- Mishra, A. K., & Mohanty, B. (2008). Acute toxicity impacts of hexavalent chromium on behavior and histopathology of gill, kidney and liver of the freshwater fish *Channa punctatus* (Bloch). *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 26, 136-141. DOI: 10.1016/j.etap.2008.02.010
- Nadeem, H., Aslam, A. M., Haque, Z., Badar, N., & Mughal, N. (2009). Drinking water contamination by chromium and lead in industrial lands of Karachi. *Journal of the Pakistan Medical Association*, 59(5), 270-274.

- Naz, A., Mishra, B. K., & Gupta, S. K. (2016). Human health risk assessment of chromium in drinking water: A case study of Sukinda Chromite Mine, Odisha, India. *Expo Health*, 8, 253-264. DOI: 10.1007/s12403-016-0199-5
- NTP, National Toxicology Program. (2008). *Toxicology and carcinogenesis of sodium dichromate dihydrate (CAS No. 7789-12-0) in F344/N Rats and B6C3F1 Mice (Drinking Water Studies)*. NTP TR 546, US Department of Health and Human Services. Recuperado de [http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/LT\\_rpts/tr546.pdf](http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/LT_rpts/tr546.pdf)
- OECD, Organization for Economic Cooperation and Development. (2004). *Guidelines for testing of chemicals. Guideline 202: Daphnia sp., acute immobilization test*. Paris, France: Organization for Economic Cooperation and Development.
- Oner, M., Atli, G., & Canli, M. (2008). Changes in serum biochemical parameters of freshwater fish *Oreochromis niloticus* following prolonged metal (Ag, Cd, Cr, Cu, Zn) exposures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27, 360-366. DOI: 10.1897/07-281R.1
- Pérez-Moreno, F. (2004). *Dinámica del arsénico en aguas subterráneas de pozos y sedimentos del distribuidor general de agua potable de Zimapán, Hidalgo* (tesis de doctorado). Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México.
- SCDB, Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. (2010). *Agua potable, diversidad biológica y desarrollo: Guía de prácticas recomendadas*. Montreal, Canadá: Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica.

- Sedman, M. R., Beaumont, J., McDonald, T. A., Reynolds, S., Krowech, G., & Howd, R. (2007). Review of the evidence regarding the carcinogenicity of hexavalent chromium in drinking water. *Journal of Environmental Science and Health. Part C, Environmental Carcinogenesis & Ecotoxicology Reviews*, 24, 155-182. DOI: 10.1080/10590500600614337
- Sharma, S. K., Petrushevski, B., & Amy, G. (2008). Chromium removal from water: A review. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 57(8), 541-53. DOI: 10.2166/aqua.2008.080
- Shaw, P., Mondal, P., Bandyopadhyay, A., & Chattopadhyay, A. (2019). Environmentally relevant concentration of chromium activates Nrf2 and alters transcription of related XME genes in liver of zebrafish. *Chemosphere*, 214, 35-46. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.104
- TCEQ, Texas Commission on Environmental Quality. (2015). *Hexavalent chromium oral reference dose*. Austin, USA: Texas Commission on Environmental Quality.
- Thompson, C. M., Kirman, C. R., Hays, S. M., Suh, M., Harvey, S. E., Proctor, D. M., Rager, J. E., Haws, L. C., & Harris, M. A. (2018). Integration of mechanistic and pharmacokinetic information to derive oral reference dose and margin-of-exposure values for hexavalent chromium. *Journal of Applied Toxicology*, 38(3), 351. DOI: 10.1002/jat.3545

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2000). *Guidelines for carcinogen risk assessment, risk assessment forum*. Washington, DC, USA: United States of America: United States Environmental Protection Agency. Recuperado de <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=116283>

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2001). *EPA530-F-00-032. An overview of risk assessment and RCRA*. Washington, D.C., USA: United States Environmental Protection Agency. Recuperado de <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/201504/documents/riskybiz.df>

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2007a). *Integrated Risk Information System (IRIS)*. Washington, DC, USA: United States of America: United States Environmental Protection Agency.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2007b). *Method 3015A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts," Revision 1*. Washington, DC, USA: United States of America: United States Environmental Protection Agency.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2010). *IRIS toxicological review of hexavalent chromium (2010 External Review Draft)*. EPA/635/R-10/004A.2010. Washington, DC, USA: United States of America: United States Environmental Protection Agency.

- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2011). *Human health risk assessment: Unpacking the "Black Box"*. Washington, DC, USA: United States of America: United States Environmental Protection Agency. Recuperado de <https://semspub.epa.gov/work/HQ/174873.pdf>
- USGS, United States Geological Survey. (2004). *Water resources research grant proposal: Chromium oxidation and reduction chemistry in soils: Relevance to chromate contamination of groundwater of the Northeastern United States*. Recuperado de <http://water.usgs.gov/wrri/96grants/ner6md.html>
- Valko, M., Morris, H., & Cronin, M. T. D. (2005). Metals, toxicity and oxidative stress. *Current Medical Chemistry*, 12, 1161-1208. DOI: 10.2174/0929867053764635
- Velma, V., Vutukuru, S. S., & Tchounwou, P. B. (2009). Ecotoxicology of hexavalent chromium in freshwater fish: A critical review. *Reviews on Environmental Health*, 24, 129-145. DOI: 10.1515/review.2009.24.2.129
- WHO, World Health Organization. (2003). *Chromium in drinking-water background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- WHO, World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking water quality: First addendum to fourth edition. Vol. 1. Recommendations*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-05

Artículos

**Monitoreo de cianobacterias como estrategia para el  
aseguramiento de la calidad del agua potable  
distribuida en el Área Metropolitana de San Salvador, El  
Salvador**

**Monitoring of cyanobacteria as a strategy to ensure the  
quality of drinking water distributed in the Metropolitan  
Area of San Salvador, El Salvador**

Luis Ortez<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1751-4529>

Yaneth Alvarado<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-9720>

Gabriela Montes<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2256-7422>

Alma Aguilar<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2465-7572>

<sup>1</sup>Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador, El Salvador, [jose.sierra@anda.gob.sv](mailto:jose.sierra@anda.gob.sv)

<sup>2</sup>Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador, El Salvador, [yaneth.alvarado@anda.gob.sv](mailto:yaneth.alvarado@anda.gob.sv)

<sup>3</sup>Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador, El Salvador, [gabriela.montes@anda.gob.sv](mailto:gabriela.montes@anda.gob.sv)

<sup>4</sup>Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, San Salvador, El Salvador, [alma.aguilar@anda.gob.sv](mailto:alma.aguilar@anda.gob.sv)



Autor para correspondencia: Luis Ortez, jose.sierra@anda.gob.sv

## Resumen

El lago de Güija posee una superficie aproximada de 45 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 21 m en época seca; forma parte del complejo lagunar homónimo y su importancia como ecosistema fue reconocida en 2010 tras la obtención de su declaratoria como sitio Ramsar. Dada su ubicación geográfica, ejerce una influencia significativa en la calidad del agua de la cuenca alta del río Lempa, por lo que la vigilancia de las comunidades fitoplanctónicas y la relación de estas con diversos factores ambientales relacionados con sus proliferaciones es de suma importancia para garantizar la seguridad del agua y la salud pública de gran parte de los habitantes del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). En vista de lo anterior, desde febrero de 2021 hasta mayo de 2023 se realizaron muestreos mensuales en cinco puntos de monitoreo dentro del lago, y se determinó que en él las proliferaciones de cianobacterias están dominadas por los géneros *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis* y *Dolichospermum*, los cuales se encuentran relacionados con el régimen de precipitación pluvial, altos valores de pH y la estratificación de la columna de agua, la cual ocurre entre abril y octubre de cada año.

**Palabras clave:** cianobacterias, calidad del agua, lago tropical, prevención de riesgo.

## Abstract

Guija's Lake has a surface area of approximately 45 km<sup>2</sup> and a maximum depth of 21 m in the dry season. It is part of the homonymous lagoon and, in 2010 was recognized as a Ramsar site. Given its geographical

location has a significant influence on the water quality of the upper basin of the Lempa River, monitoring the phytoplankton communities and their relationship with various environmental factors related to “blooms” is of utmost importance to guarantee the safety of water and the public health of a large part of the inhabitants of the AMSS. Because of the above, from February 2021 to May 2023, monthly sampling was carried out at 5 monitoring points within the lake, determining that the genera that dominated the “blooms” belong to the cyanobacterial Phylum to the genera *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, and *Dolichospermum*, which they are related to the rainfall regime, high pH values and the stratification of the water column, which occurs between April and October of each year.

**Keywords:** Cyanobacteria, water quality, tropical lake, risks prevention.

Recibido: 15/07/2024

Aceptado: 15/10/2024

Publicado *ahead of print*: 31/10/2024

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

La Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) es el operador de agua potable y saneamiento más grande de El Salvador; en la actualidad, solamente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) abastece a más de 1.5 millones de habitantes, a través de cuatro sistemas de explotación, entre los cuales se encuentra la Planta Potabilizadora Torogoz (PPT), cuya fuente de abastecimiento es el río

Lempa y que por sí sola representa cerca del 30 % del abastecimiento total de agua potable para el AMSS (ANDA, 2020).

Dada la naturaleza de su fuente de abastecimiento, la PPT es vulnerable ante la ocurrencia de fenómenos naturales, como las proliferaciones algales, sobre todo durante la época de estiaje, situación que quedó de manifiesto a finales de 2019 y principios de 2020, cuando una intensa proliferación dominada por cianobacterias ocurrida en el lago de Güija afectó seriamente la calidad del agua producida en la planta.

La ocurrencia de estos eventos representa un serio desafío tanto a nivel técnico-operacional como a nivel económico para cualquier operador de agua potable del mundo, por lo que su abordaje no depende solo de un tratamiento puntual, con la aplicación de químicos en la planta potabilizadora, sino más bien debe abordarse desde una estrategia con enfoque de cuenca y adaptabilidad al cambio climático basada en el principio de prevención.

Es por ello que desde febrero de 2021, la ANDA, en coordinación con la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) realiza el monitoreo de la comunidad fitoplanctónica del lago de Güija, así como de los factores ambientales asociados con la proliferación de estos organismos, con el objetivo de minimizar los impactos negativos de dichos fenómenos en el agua producida por la planta Torogoz, ubicada 46 km aguas abajo del lago de Güija.

Tradicionalmente la gestión del agua se ha enfocado en garantizar la disponibilidad y accesibilidad de las poblaciones al recurso; sin embargo, a partir de la promulgación de la Agenda 2030 y de los Objetivos De Desarrollo Sostenible de la ONU en septiembre de 2015, el tema de

calidad del agua ha sido considerado como una meta importante de alcanzar en el corto plazo, meta que El Salvador, como país signatario de la agenda, se ha comprometido a asumir como propia (ONU, 2018; ODS El Salvador, 2023).

Pese a lo anterior, el tema de aseguramiento de la calidad del agua es uno de los principales retos que enfrenta la mayoría de los operadores de agua potable y saneamiento en la región latinoamericana, principalmente cuando se utilizan fuentes superficiales para su abastecimiento, pues por su naturaleza son mucho más susceptibles a diversos tipos de contaminación (Jiménez-Cisneros & Galizia-Tundisi, 2012).

Hacia finales del siglo XIX, la perspectiva del aseguramiento y control de la calidad del agua giraba en torno a la contaminación fecal y orgánica; después, en la década de 1960, a partir del auge de la agricultura intensiva a gran escala, la vigilancia de la calidad se centró en los procesos de eutrofización y la proliferación de algas del fitoplancton, en especial de las cianobacterias, que por la potencialidad de producir eventos tóxicos se consideran fenómenos naturales que pueden llegar a generar problemas de salud pública (Giannuzzi, 2009; Vammen, 2015).

En la actualidad, en el mundo, muchos países, entre ellos Canadá, Australia, Brasil y Panamá, han incluido en sus reglamentos de calidad de agua destinada a consumo humano aspectos relacionados con el manejo de riesgo ante la ocurrencia de proliferaciones de cianobacterias tanto en sus sistemas de distribución como en las fuentes de abastecimiento, lo que le brinda a los operadores de agua potable un marco de referencia sobre qué aspectos considerar en cuanto a este tipo de amenazas a la calidad del agua (Chorus, 2012; MCI, 2019).

El Salvador, cuenta con un Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS) para aguas de consumo humano, el cual no incluye ninguno de estos aspectos; sin embargo, la ANDA ha implementado diversos protocolos de actuación ante la ocurrencia de estos fenómenos naturales, con el propósito de minimizar al máximo los impactos negativos que pudieran generar al proceso de potabilización.

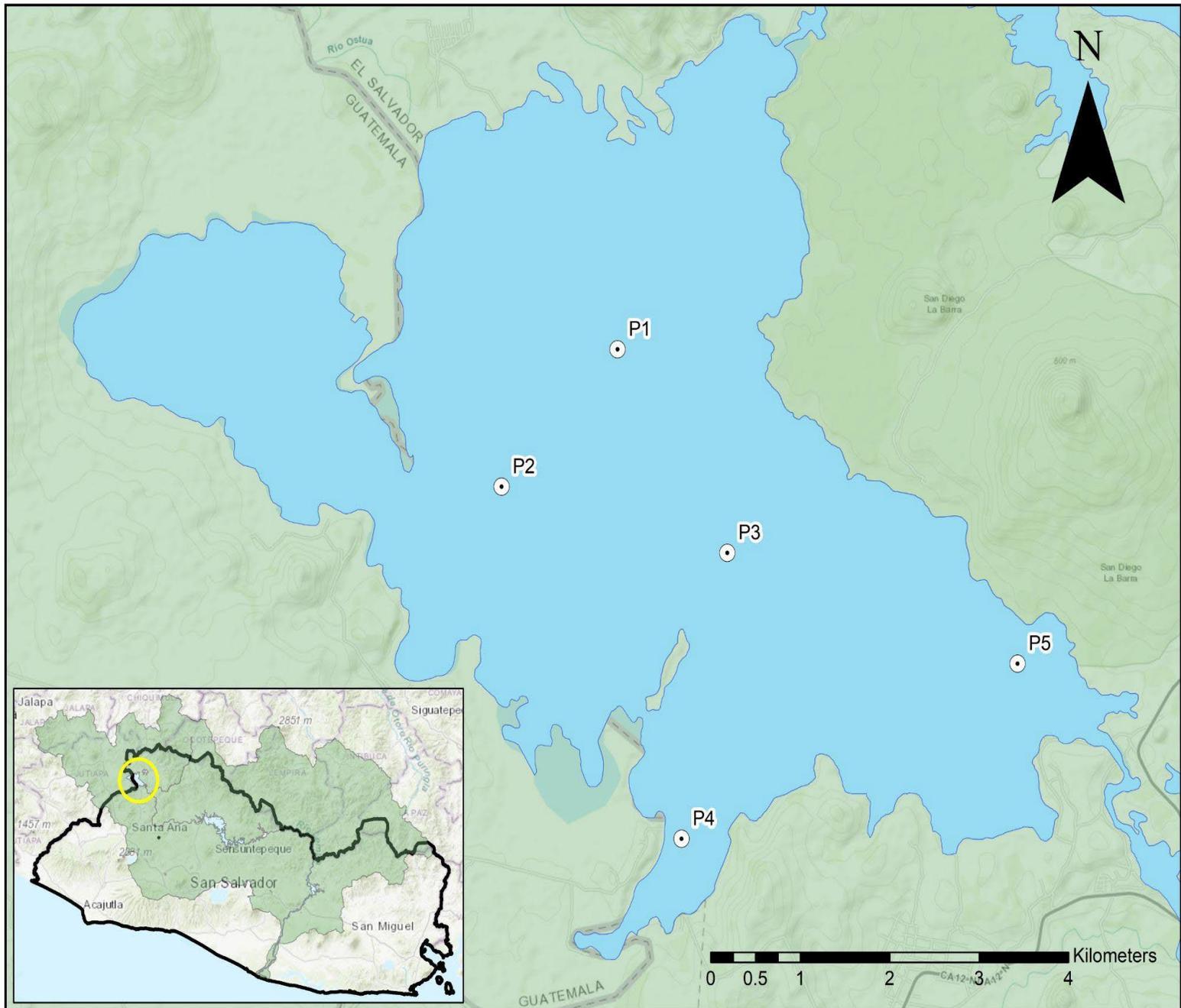
Por lo anterior y conscientes de la vulnerabilidad de la planta potabilizadora ante los fenómenos naturales de proliferaciones fitoplanctónicas, se ha trabajado en el desarrollo de procedimientos internos que establecen acciones específicas a realizar en el proceso de potabilización, e inclusive bajo el principio de prevención se ha mantenido desde 2021 un constante monitoreo en el lago de Güija, del cual se presentan los hallazgos más relevantes en el presente artículo.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El lago de Güija forma parte del complejo lagunar homónimo, el cual fue declarado sitio Ramsar el 16 de diciembre de 2010; posee una superficie aproximada de 45 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 21 m en época seca; cuenta con tres afluentes originados en Guatemala, los ríos Angüe, Cusmapa y Ostúa, así como un efluente por el cual conecta sus aguas con el río Lempa dentro del territorio salvadoreño, denominado río Desagüe o Guajoyo (Figura 1). Al este limita con territorio guatemalteco, mientras que al oeste se encuentra rodeado en su mayoría por el Área Natural Protegida de San Diego y San Felipe Las Barras, zona que, de acuerdo

con la clasificación de vida de Holdridge, corresponde a bosque seco tropical (MAG, 1978).



**Figura 1.** Ubicación del área del estudio y sitios de muestreo.

## Muestreo y medición de parámetros ambientales

Considerando las zonas de influencia de los afluentes que llegan al lago de Güija, así como la zona de mayor profundidad y salida del mismo, se establecieron cinco puntos de monitoreo (Figura 1), en los cuales, de forma mensual, desde febrero de 2021 hasta mayo de 2023, se realizó la toma de muestras para la medición a distintas profundidades de clorofila "a", pH, oxígeno disuelto, potencial redox y temperatura; dichas mediciones se hicieron con una sonda multiparamétrica (XYLEM/YSI modelo EXO 2), mientras que los datos de lluvia y temperatura promedio mensual fueron provistos por el MARN y corresponden a los registros de la estación Güija (14° 13' 42" N - 89° 28' 12" O). Por otro lado, entre diciembre de 2021 y diciembre de 2022 se determinó la concentración de fósforo y nitrógeno total por fotometría a través del método del ácido ascórbico y del persulfato, para lo cual se utilizó el test Spectroquant.

## Muestreo de cianobacterias

La recolección de muestras cuantitativas se llevó a cabo en los sitios de muestreo considerados para la medición de los parámetros ambientales; se establecieron dos profundidades de trabajo: una superficial, ubicada en los primeros 50 cm de la columna de agua; y otra de profundidad, la cual coincidía con la medida del Disco Secchi. Posteriormente, utilizando una botella oceanográfica horizontal de tipo Van Dorn (modelo Alfa 2.2 I, Wildco®), se tomaron muestras de 500 ml en cada nivel de profundidad y se depositaban en frascos de polietileno, a los que se les añadía 5 ml de solución de Lugol al 1 % como conservante, para finalmente

almacenarlas en hieleras a 4 °C para su traslado hasta el laboratorio. Las muestras cualitativas se recolectaron con una red de fitoplancton de 20 µm de luz de malla (Watermark simple plankton nets 77974), con la cual se hizo un arrastre vertical de la zona fótica (Zeu), la cual se determinó a partir de la Ecuación (1), utilizando de la medida de transparencia del Disco Secchi (DS) en cada punto de muestreo. Luego la muestra colectada se guardó en frascos de 100 ml a 4 °C para su traslado al laboratorio:

$$Z_{eu} = 1.92 * DS \quad (1)$$

## Procesamiento de las muestras

La identificación taxonómica de las cianobacterias presentes en el lago de Güija se realizó con un microscopio invertido marca Motic modelo AE31E, a una magnificación máxima de 400X; así como claves y bases de datos taxonómicas especializadas como las de UNESCO (Bonilla, 2009), Prescott (1982a), Prescott (1982b), y Guiry y Guiry (2023). Después de la identificación taxonómica, se cuantificaron las muestras utilizando una cámara Sedgewick Rafter (modelo 1801-G20, Wildco®), a través de la metodología propuesta por Reguera Alonso, Moreira y Méndez (2011).

## Análisis estadístico

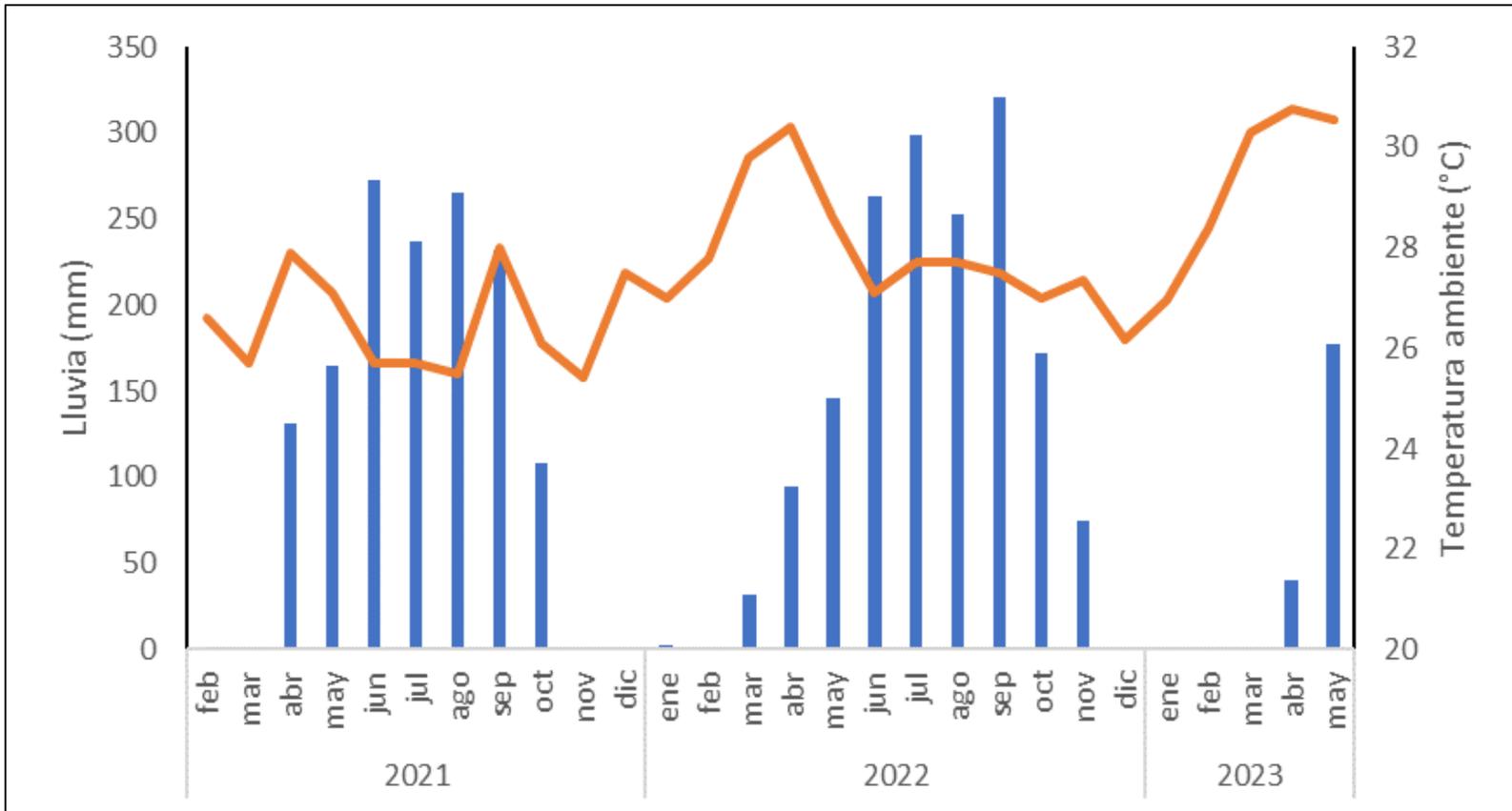
Con el propósito de evaluar las variaciones espaciales (puntos de muestreo) y temporales (meses de muestreo) de los parámetros ambientales considerados en este estudio, se empleó la prueba de Kruskal Wallis a un 95 % de confianza. Posteriormente, los datos se transformaron empleando el  $\text{Log}_10$  con el propósito de determinar la

relación de los parámetros ambientales con la abundancia de cianobacterias a través de la prueba de correlación de Spearman. Finalmente, se elaboró un modelo de regresión lineal múltiple para determinar cuáles parámetros ambientales pueden ayudar como predictores de la abundancia celular de cianobacterias en el lago de Güija.

## Resultados

### Lluvia y temperatura ambiente

De acuerdo con los registros obtenidos de la estación Güija, durante 2021, la distribución de lluvia se dio entre abril y octubre, con un promedio mensual de 201.5 mm y un acumulado de 1 410 mm, mientras que para 2022 fue de marzo a noviembre, con un promedio mensual de 183.9 mm y un acumulado de 1 654.8 mm. Por otro lado, los registros de temperatura ambiente muestran que la temperatura promedio mensual para 2021 fue de 26.5 °C, mientras que para 2022 fue de 27.8°C; se observó un aumento sostenido, el cual suele tener picos máximos previo al inicio de la estación lluviosa y desciende una vez que dicha estación está plenamente establecida (Figura 2).



**Figura 2.** Distribución de los registros de lluvia acumulada mensual y temperatura promedio mensual de la estación meteorológica Guija.

Fuente: MARN-DOA (2023).

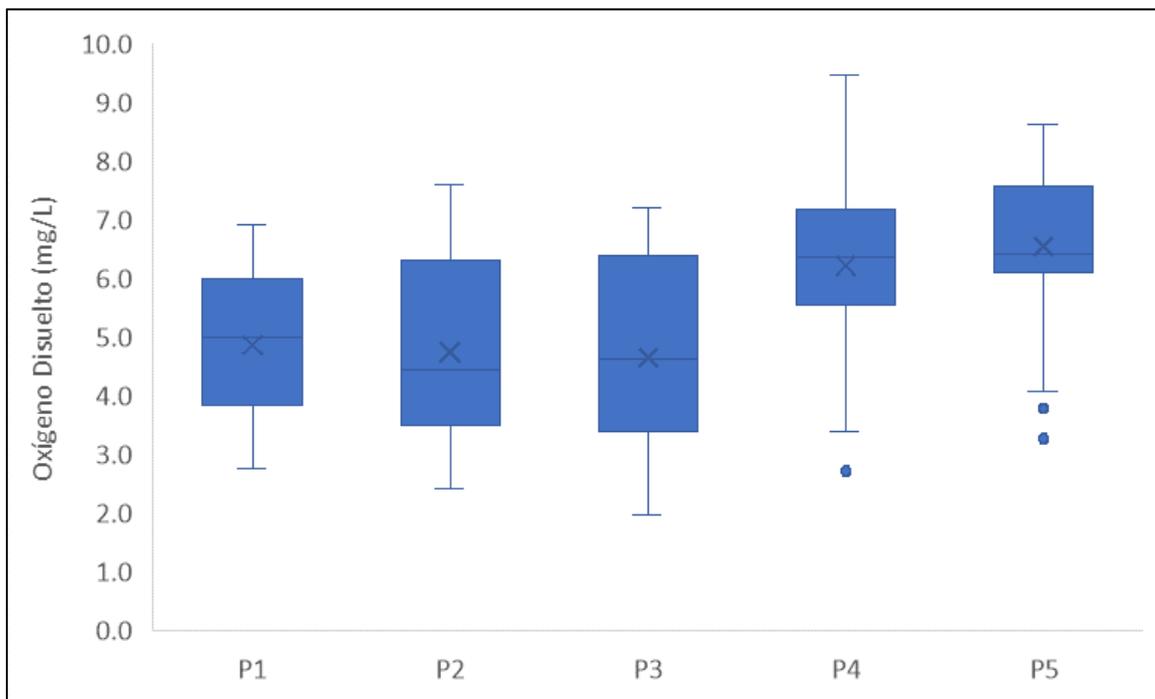
### Factores ambientales

En la Tabla 1 se pueden observar valores mínimos, máximos y promedios de cada uno de los parámetros ambientales monitoreados para el periodo de estudio. Mediante la aplicación de la prueba de Kruskal-Wallis se determinó que, con excepción del oxígeno disuelto, el resto de los factores ambientales tiene un comportamiento homogéneo a escala espacial en el lago de Güija (Tabla 1).

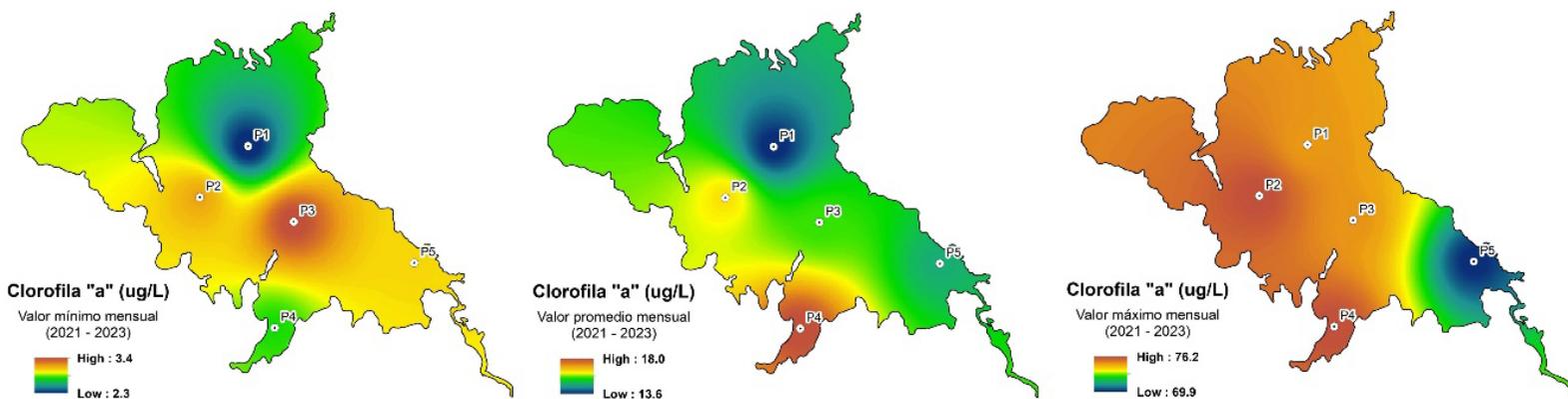
**Tabla 1.** Valores mínimos, máximos y promedios de cada parámetro ambiental monitoreado.

Parámetro ambiental	Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio
Clorofila "a"	µg/l	2.27	76.21	15.63
pH	--	6.22	9.35	8.56
Oxígeno disuelto	mg/l	1.97	9.49	5.41
Potencial REDOX	mV	-55.94	245.10	67.17
Temperatura del agua	°C	24.36	30.79	27.88

La Figura 3 muestra que los puntos situados al sur del lago (P4 y P5) tienen concentraciones significativamente mayores de oxígeno disuelto respecto al resto de puntos de muestreo, lo cual podría estar relacionado con la alta actividad fotosintética generada por el fitoplancton, ya que también, como se puede observar en la Figura 4, dicha zona es donde se han encontrado las mayores concentraciones de clorofila "a", la cual es un indicador de la presencia de estos organismos.



**Figura 3.** Variabilidad del oxígeno disuelto por punto de muestreo durante el periodo de estudio.

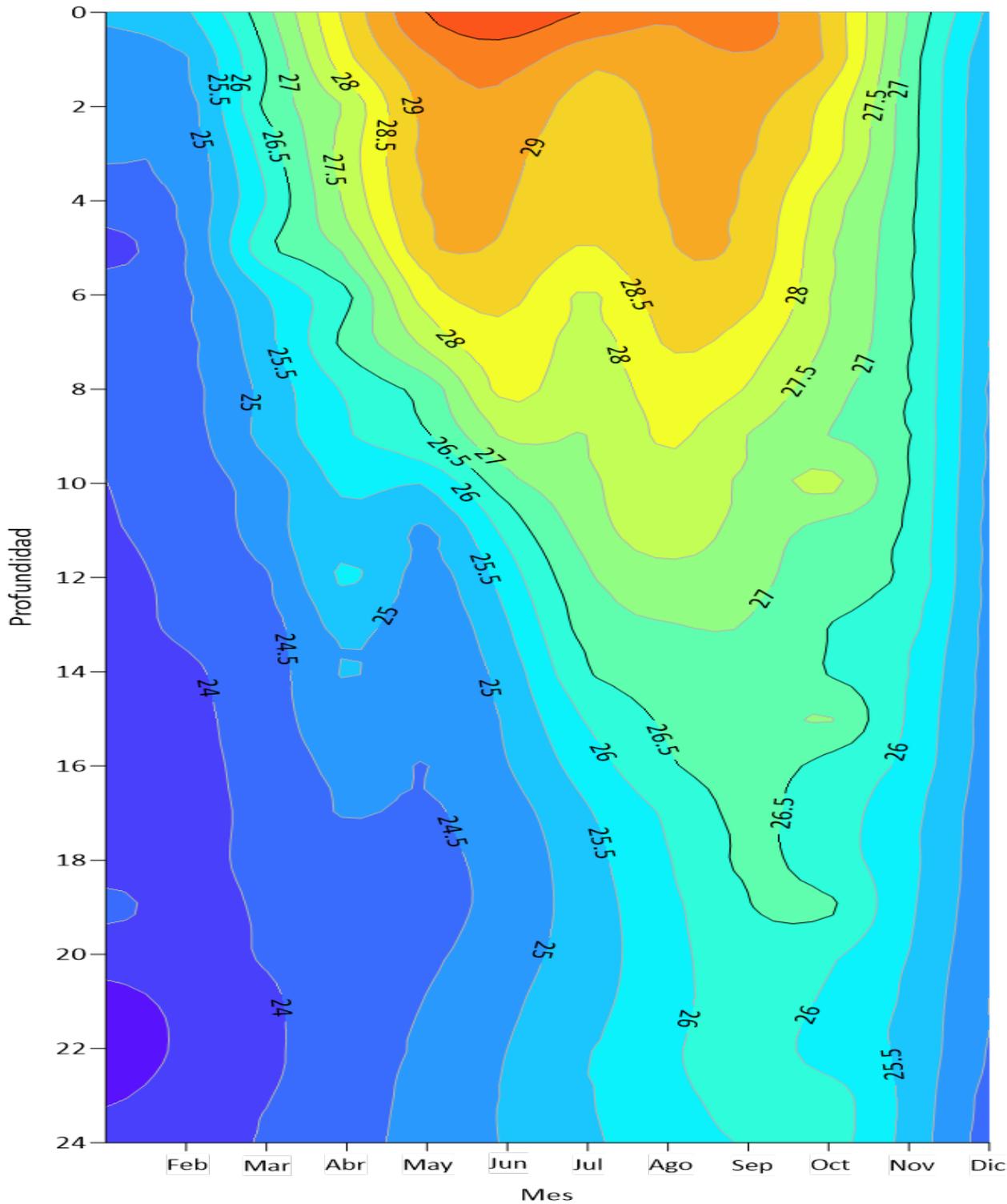


**Figura 4.** Distribución espacial de los valores mínimo, promedio y máximo de clorofila "a" en el lago de Güija durante el periodo de estudio.

En cuanto a la escala temporal, todos los factores ambientales, exceptuando la clorofila "a", mostraron cambios significativos a escala mensual durante el periodo de estudio. La Figura 4 muestra los valores promedio, mínimos y máximos de la distribución superficial de clorofila "a"; se evidencia que en el sector noroeste del lago, especialmente la zona de influencia del río Cusmapa, es donde se registran los valores más altos de concentración de este pigmento fotosintético.

## Temperatura del agua

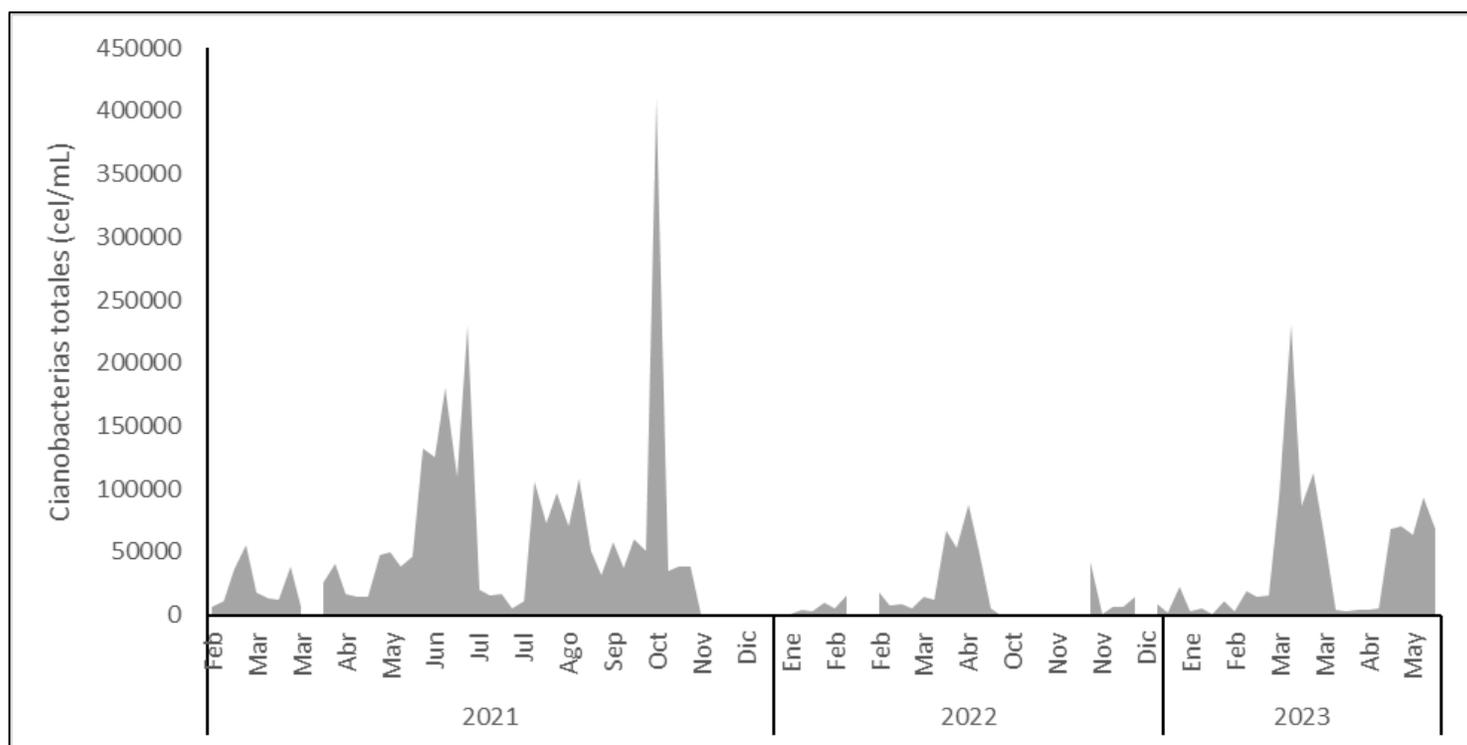
A través del monitoreo constante se ha registrado y caracterizado el régimen térmico anual de la columna de agua; se observa una estratificación estacional entre abril y octubre, mientras que de noviembre a marzo el lago presenta un patrón de mezcla (Figura 5).



**Figura 5.** Distribución promedio anual de la temperatura en la columna de agua del lago de Güija.

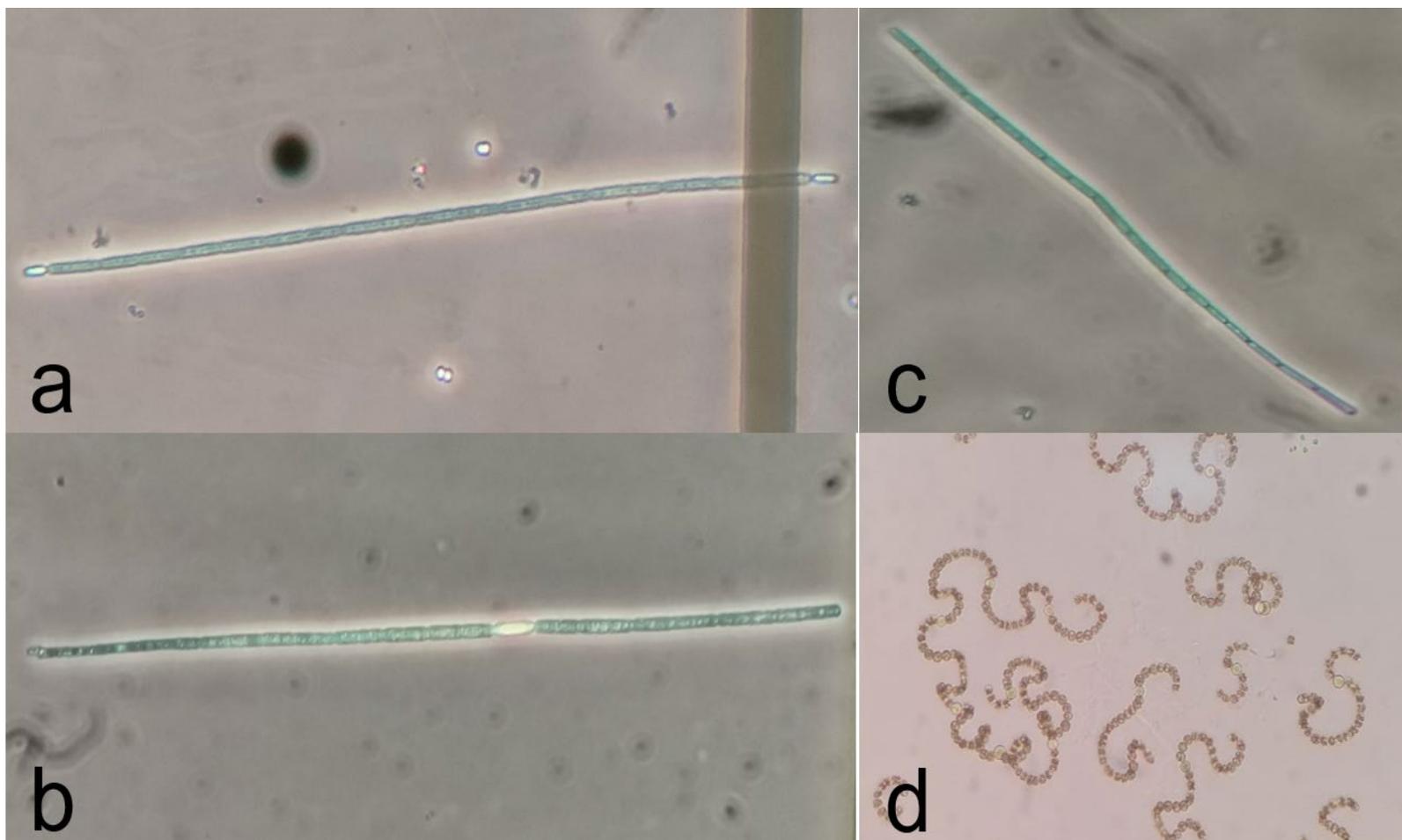
## Cianobacterias

Durante el periodo de estudio, las cianobacterias representaron en promedio el 72.2 % de la composición fitoplanctónica total del lago de Güija, y en algunas ocasiones llegaron a alcanzar hasta el 99.99 %. La concentración más alta de estos organismos tuvo lugar en el P2 durante octubre de 2021, con un registro de  $4.1 \times 10^5$  cel/ml (Figura 6), lo cual sobrepasa por mucho el valor guía de concentración de estos organismos propuesto por la OMS tanto para aguas destinadas a consumo humano como para aguas destinadas a la recreación con contacto ( $> 200\ 000$  cel/ml; Chorus & Bartram, 1999).



**Figura 6.** Variación de la concentración total de cianobacterias durante el periodo de estudio.

Los géneros más abundantes reportados fueron *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Pseudanabaena* y *Dolichospermum* (Figura 7), cada uno de los cuales ha generado proliferaciones intensas, especialmente durante febrero, marzo, junio y octubre; además, cabe destacar que todos ellos tienen la potencialidad de generar eventos tóxicos, por lo que su vigilancia se vuelve un asunto de importancia para la salud pública.



**Figura 7.** Géneros de cianobacterias más abundantes en el lago de Güija: a) *Cylindrospermopsis*, b) *Aphanizomenon*, c) *Pseudanabaena*, d) *Dolichospermum*. Imágenes a, b y c 400x; d 100x.

## Nutrientes

Durante el periodo en el que se realizaron las mediciones de nitrógeno y fósforo total no se observaron diferencias significativas en su distribución dentro del lago de Güija; sin embargo, al comparar dichas concentraciones entre los diferentes meses de cada estación seca, se observó que existen diferencias significativas (nitrógeno,  $F = 5.07$ ,  $p < 0.05$ ; fósforo  $F = 7.47$ ,  $p < 0.05$ ); en noviembre se presentaron las mayores concentraciones en ambos analitos. Por otro lado, se evaluó la relación entre ambos nutrientes y se observó que en promedio la relación N:P fue de 7:1, con una máxima de 12:1 y una mínima de 2:1.

## Relación entre cianobacterias y parámetros ambientales

La relación entre concentración de cianobacterias con el registro de los diversos parámetros ambientales monitoreados en el lago de Güija se evaluó a través de la correlación de Spearman; se encontró que tanto la lluvia ( $r = 0.68$ ,  $p < 0.05$ ) como la temperatura del agua ( $r = 0.62$ ,  $p < 0.05$ ) muestran relaciones significativas de mediana intensidad con la abundancia de estos organismos. Posteriormente se generó un modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación (2)) empleando todos los parámetros ambientales como predictores de la abundancia celular de cianobacterias; se obtuvo que estos, en conjunto, explican el 72.18 % de dicha abundancia ( $F = 17.0$ ,  $p < 0.01$ ); sin embargo, solo los parámetros lluvia y pH fueron significativos ( $p < 0.05$ ):

$$\begin{aligned} \text{Ciano} = & -32.47 - (1.97 * T_{\text{amb}}) + (4.41 * T_{\text{agua}}) - (0.016 * OD) - (0.14 * RDX) + \\ & (34.1 * pH) + (0.6 * LL) \end{aligned} \quad (2)$$

En donde:

T = temperatura

OD = oxígeno disuelto

RDX = potencial redox

LL = lluvia acumulada mensual

## Discusión

La vigilancia de las proliferaciones fitoplanctónicas, especialmente de aquellas dominados por cianobacterias, son de sumo interés para los operadores de agua potable que se abastecen de fuentes susceptibles a este tipo de contaminación, pues dependiendo de diversos factores como la intensidad y extensión de la proliferación, la proximidad de ocurrencia del fenómeno con la infraestructura sanitaria y el tipo de tecnología implementada en el tratamiento del agua pueden ocasionar que se minimice o suspenda totalmente la producción, lo que afecta el abastecimiento del agua potable y en el caso de El Salvador es un tema particularmente sensible; esto, sin mencionar posibles afectaciones a la salud pública en el caso de que los organismos que proliferen tengan la potencialidad de producir metabolitos tóxicos (Walker, 2014).

Por lo anterior, el monitoreo efectivo de las fuentes de agua, así como de sus afluentes, en el caso de tenerlos, es la base de un sistema de alerta temprana ante este tipo de fenómenos. Caracterizar el comportamiento de diversos parámetros ambientales asociados con la

comunidad fitoplanctónica del lago de Güija es el primer paso en la implementación de una estrategia de aseguramiento de la calidad del agua destinada al consumo humano en la cuenca alta del río Lempa (Sklenar, Westrick, & Szlag, 2016), sobre todo si se considera la dinámica agroambiental que rodea al lago, en donde hay zonas de intensa actividad agrícola, lo cual, aunado a las intensas precipitaciones registradas en la zona, favorecen el movimiento de nutrientes y otro tipo de contaminantes hacia el espejo de agua, lo que de manera consecuente favorece la proliferación de cianobacterias (Basterrechea, 2008; Chávez & Martínez, 2012; Luna *et al.*, 2013; Madrid, 2015).

Al realizar el monitoreo de los parámetros ambientales evaluados en el presente estudio, se evidenció que presentan una marcada estacionalidad; por ejemplo, en el caso de la temperatura, en mayo de 2023 se observó un incremento en más de 1.5 °C en la temperatura del agua respecto a marzo del mismo año, cuando se registró una máxima de 30.2 °C. Estas condiciones favorecen la proliferación de cianobacterias, pues se estima que muchos de estos organismos tienen sus tasas máximas de crecimiento sobre los 25 °C (O'Neil, Davis, Burford, & Gobler, 2012); no obstante, este aumento de temperatura por sí solo no sería el desencadenante de una proliferación, sino que estaría asociado con otros fenómenos, como la estratificación de la columna de agua (Figura 5), y proporcionaría las condiciones ideales para que las cianobacterias, con vesículas de gas como las del género *Dolichospermum*, se muevan hacia la superficie, en donde tendrían mejor acceso a la luz solar, que les permitiera aumentar su metabolismo y por ende generar proliferaciones intensas (Bonilla, 2009; Dalu & Wasserman, 2018; Huisman *et al.*, 2018).

Asimismo, las condiciones de pH alcalino, presentes en el lago de Güija, suelen relacionarse con proliferaciones de cianobacterias; sin

embargo, esto, más que una causa, podría considerarse una consecuencia, ya que la alta actividad fotosintética originada por la abundante biomasa de cianobacterias puede provocar alteraciones en equilibrio bicarbonato-carbonato, que confieren al agua altos valores de pH (Dalu & Wasserman, 2018; Chorus & Welker, 2021; Ortez, Rovira, & Morán, 2022). Por otro lado, la presencia abundante de nutrientes, en especial de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas acuáticos están relacionados con la degradación del estado trófico del mismo, pues favorecen el crecimiento de las cianobacterias (Bravo-Inclán, Tomasini-Ortiz, Sánchez-Chávez, & Moeller-Chávez, 2012).

En el lago de Güija, las relaciones N:P encontradas indican que el elemento limitante del medio es el nitrógeno (Bonilla, 2009); a pesar de ello, las proliferaciones de cianobacterias se mantienen activas, lo cual se puede apreciar en la distribución de la clorofila "a", que presenta su mayor concentración en el sector noroeste del lago, así como en las zonas limítrofes con Guatemala y en la desembocadura del río Cusmapa, sobre todo durante la época seca. Dichas proliferaciones son dominadas por organismos pertenecientes a géneros, como *Dolichospermum*, *Aphanizomenon* y *Cylindrospermopsis*, que se caracterizan por poseer heterocistos, células especializadas que les permiten fijar el nitrógeno atmosférico, por lo que la ausencia de este en el medio no limita su crecimiento, sino por el contrario, les confiere una ventaja competitiva frente a otros grupos del fitoplancton (Paerl & Otten, 2012; Huisman, 2018).

Durante estos tres años de monitoreo continuo se ha determinado que la dinámica de los parámetros ambientales, como pH, lluvia, temperatura del agua y la carga de nutrientes genera las condiciones ideales para la ocurrencia de proliferaciones de cianobacterias en el lago

de Güija, que por ser un enclave natural de gran influencia en la calidad del agua de la cuenca alta del Lempa debe contar con protocolos de vigilancia sanitaria efectivos que permitan establecer un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de estos fenómenos, a fin de alertar a la población en general y en especial a los operadores de agua potable, para garantizar el aseguramiento de la calidad del agua de consumo humano y por ende la salud pública, sobre todo de la población que habita en el Área Metropolitana de San Salvador.

## Conclusiones

Las proliferaciones de cianobacterias en el lago de Güija presentan una marcada estacionalidad y registran sus más altos valores de concentración celular durante los meses de la época seca (noviembre-abril), que coincide con los periodos de estratificación térmica de la columna de agua; además, se encuentran estrechamente relacionadas con valores altos de pH y con el régimen de precipitaciones en la zona. Las pruebas estadísticas indican que los parámetros ambientales muestran un comportamiento homogéneo en los diferentes puntos de muestreo del lago, lo cual no ocurre con la concentración de cianobacterias, las cuales tienden a concentrarse en el sector noroeste del lago, en las zonas limítrofes con Guatemala y en la desembocadura del río Cusmapa. El lago de Güija —por ser un enclave natural de gran influencia en la calidad del agua de la cuenca alta del Lempa— debe contar con un régimen de vigilancia sanitaria especial, ya que si bien es cierto que en la actualidad en el país no se consideran valores de referencia para aguas naturales, es de vital importancia legislar al respecto, a fin de

promover el aseguramiento de la calidad del agua para el uso que fuere desde una perspectiva de cuenca.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de la ANDA por el apoyo y reconocimiento al trabajo realizado por el personal técnico en pro del aseguramiento de la calidad del agua en todo su ciclo de gestión. Asimismo, agradecen a CEL y MARN por el apoyo en campo con equipo y personal en cada una de las campañas de muestreo.

### Referencias

- ANDA, Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. (2020). *Boletín estadístico*. San Salvador, El Salvador: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- Basterrechea, M. (2008). *Levantamiento de la línea base de la laguna Guija, previo al inicio de operaciones de un proyecto minero (informe)*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Asesoría Manuel Basterrechea Asociados, S.A.
- Bonilla, S. (ed.). (2009). *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión* (documento técnico PHI-LAC, No 16). París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Bravo-Inclán, L., Tomasini-Ortiz, A. C., Sánchez-Chávez, J. J., & Moeller-Chávez, G. (2012). *Estudio de eutroficación del lago de Pátzcuaro, Mich., y su relación con los florecimientos de cianobacterias*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, 2 al 7 de noviembre, Acapulco, Guerrero, México.

- Chávez, F., & Martínez, E. (2012). Informe de estudios sobre humedales en Metapán. Recuperado de [http://riolempa.org/wp-content/uploads/2020/11/Informe\\_de\\_estudios\\_sobre\\_humedales\\_en\\_Metapan\\_\\_17\\_Ago\\_12\\_.pdf](http://riolempa.org/wp-content/uploads/2020/11/Informe_de_estudios_sobre_humedales_en_Metapan__17_Ago_12_.pdf)
- Chorus, I. (2012). *Current approaches to Cyanotoxin risk assessment, risk management and regulation in different countries*. Recuperado de <http://www.uba.de/uba-info-medien-e/4390.html>
- Chorus, I., & Bartram, J. (eds.). (1999). *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. Ginebra, Suiza: E&FN Spon, London, Organización Mundial de la Salud. DOI: 10.4324/9780203478073
- Chorus, I., & Welker, M. (2021). *Toxic Cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management (2<sup>nd</sup> ed.)*. Geneva, Switzerland: World Health Organization. DOI: 10.1201/9781003081449
- Dalu, T., & Wasserman, R. J. (2018). Cyanobacteria dynamics in a small tropical reservoir: Understanding spatio-temporal variability and influence of environmental variables. *Science of the Total Environment*, 643, 835-841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.256
- Giannuzzi, L. (2009). *Cianobacterias y cianotoxinas. Identificación, toxicología, monitoreo y evaluación de riesgo*. Recuperado de <https://cyanosur.fiba.org.ar/wp-content/uploads/2021/11/2009-Cianobacterias-y-Cianotoxinas-.pdf>
- Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (January 27, 2023). *AlgaeBase. World-Wide electronic publication*. Galway, Ireland: National University of Ireland. Recuperado de <https://www.algaebase.org>

- Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. H., & Visser, P. M. (2018). Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 16(8), 471-483. DOI: 10.1038/s41579-018-0040-1
- Jiménez-Cisneros, B., & Galizia-Tundisi, J. (coords.). (2012). *Diagnóstico del agua en las Américas*. Recuperado de [https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2012/03/Libro\\_Diagnostico\\_del\\_Agua\\_en\\_las\\_Americas.pdf](https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2012/03/Libro_Diagnostico_del_Agua_en_las_Americas.pdf)
- Luna, J. R., Cosillo, A., Gordillo, C., Vendrell, P., Solís, L., Navichoque, G., & Contreras, L. (2013). *Análisis de la información de la cuenca Ostúa-Güija, con énfasis en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y la incidencia del proyecto minero Cerro Blanco*. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2013/02/INFORME-FINAL-ANALISIS-CUENCA-OSTUA-GUIJA-10-DE-JUNIO.pdf>
- Madrid, E. (2015). Calidad del agua y estado trófico en el lago de Güija y sus ríos afluentes y efluente para un programa de monitoreo. Managua, Nicaragua: Universidad Autónoma de Nicaragua, Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua.
- MCI, Ministerio de Comercio e Industria de Panamá. (2019). Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-2019 Tecnología de los Alimentos. Agua potable. Definiciones y Requisitos Generales. *Gaceta Oficial Digital*, 28777, 1-15. Recuperado de [https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28777\\_B/GacetaNo\\_28777b\\_20190520.pdf](https://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/28777_B/GacetaNo_28777b_20190520.pdf)

- MAG, Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador. (1978). *Mapa ecológico de El Salvador. Sistema de Zonas de Vida del DR. LR. Holdridge. 1:300 000. San Salvador. Santa Tecla, El Salvador: Instituto Geográfico Nacional "Ingeniero Pablo Arnoldo Guzmán".*
- MARN-DOA, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales. (2023). Respuesta a solicitud de información pública.
- O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., & Gobler, C. J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 14, 313-334. DOI: 10.1016/j.hal.2011.10.027
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2018). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Nueva York, EUA: Organización de las Naciones Unidas.
- ODS El Salvador. (14 de julio 2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus metas*. Recuperado de <http://odselsalvador.egob.sv/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ortez, L., Rovira, M. D., & Morán, L. (2022). Distribución espaciotemporal de cianobacterias planctónicas y factores ambientales asociados a sus proliferaciones en el embalse Cerrón Grande, El Salvador. *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 250-262. DOI: 10.15517/rev.biol.trop.v70i1.47625
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2012). Harmful Cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Environmental Microbiology*, 65, 995-1010. DOI: 10.1007/s00248-012-0159-y
- Prescott, G. (1982a). *Algae of the Western Great Lakes area*. Boston, USA: Brown Publishers.

- Prescott, G. (1982b). *How to know the freshwater algae*. Missoula, USA: University of Montana.
- Reguera, B., Alonso, R., Moreira, A., & Méndez, S. (2011). *Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas*. París, Francia: Comisión Oceanográfica Intergubernamental Manuales-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Sklenar, K., Westrick, J., & Szlag, D. (September, 2016). *Managing Cyanotoxins in drinking water: A technical guidance manual for drinking water professionals managing Cyanotoxins in drinking water*. Denver, USA: American Water Works Association and Water Research Foundation.
- Vammen, K. (2015). *Desafíos del agua urbana en las Américas: Perspectivas de las academias de ciencias*. París, Francia: Red Interamericana de Academias de Ciencias-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. DOI: 10.22231/asyd.v12i3.238
- Walker, H. W. (2014). Harmful algae blooms in drinking water. In: *Harmful Algae Blooms in Drinking Water*. DOI: 10.1201/b17922

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-06

Artículos

**Metodologías y estudios en torres de enfriamiento húmedas a contraflujo con enfoque en la reducción de las pérdidas de agua por evaporación y arrastre**  
**Methodologies and studies on counterflow wet cooling towers: strategies for reducing water losses through evaporation and drift**

Carlos René Ramírez-Ferreira<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1429-0977>

Carlos Rubio-Maya<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7676-9145>

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, [1180831e@umich.mx](mailto:1180831e@umich.mx)

<sup>2</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, [carlos.maya@umich.mx](mailto:carlos.maya@umich.mx)

Autor para correspondencia: Carlos René Ramírez-Ferreira, [1180831e@umich.mx](mailto:1180831e@umich.mx)

## Resumen

El presente trabajo muestra una comparativa de estudios realizados a torres de enfriamiento húmedas a contraflujo para sintetizar aportes, estudios y metodologías que permitan dar un contexto reciente al estado actual de la investigación en este campo. Este trabajo parte desde los fundamentos básicos en torres de enfriamiento, sus secciones de estudio y problemáticas a resolver, con un enfoque hacia el consumo de agua en los procesos evaporativos por transferencia de calor en gotas de agua para calcular las pérdidas de agua por evaporación y arrastre. Se revisan y discuten los fundamentos de torres de enfriamiento y aplicaciones generales, los métodos comunes de investigación en torres de enfriamiento utilizados, con énfasis en las características particulares según el tipo de estudio, ya sea desde el punto de vista de diseño de la torre de enfriamiento, las características que afectan su funcionamiento o desempeño, los fundamentos de análisis energético, las sugerencias en la realización de estudios numéricos y simulaciones por CFD, además de su validación correspondiente mediante estudios experimentales. La información recopilada en este trabajo proporciona una visión general y simplifica los avances esenciales en la reducción de las pérdidas por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento a contraflujo, las características y tendencias en el desarrollo de modelos matemáticos computacionales y recomendaciones para llevar a cabo estudios teóricos y experimentales para comprender más ampliamente los mecanismos de transferencia de calor y masa.

**Palabras clave:** torre de enfriamiento a contraflujo, gotas de agua, evaporación, arrastre.

## Abstract

This paper presents a comparison of studies carried out on counterflow cooling towers to synthesize contributions, studies and methodologies that provide a recent context for the current state of research in this field. This work starts from the basic fundamentals of cooling towers, their study sections and problems to be solved, with a focus on water consumption in evaporative processes by heat transfer in water droplets to calculate water losses by evaporation and drag. The fundamentals of cooling towers and general applications are reviewed and discussed, as well as the common research methods used in cooling towers, emphasizing the particular characteristics according to the type of study; whether from the point of view of cooling tower design, the characteristics that affect its operation or performance, the fundamentals of energy analysis, suggestions for carrying out numerical studies and CFD simulations, in addition to their corresponding validation through experimental studies. The information gathered in this paper provides an overview and simplifies the essential advances in reducing evaporation and drag losses in counterflow cooling towers, the characteristics and trends in the development of computational mathematical models, and recommendations for carrying out theoretical and experimental studies for better understanding of heat and mass transfer mechanisms.

**Keywords:** Counter flow cooling tower, water droplets, evaporation, drag.

Recibido: 25/09/2024

Aceptado: 21/01/2025

Publicado *ahead of print*: 30/01/2025

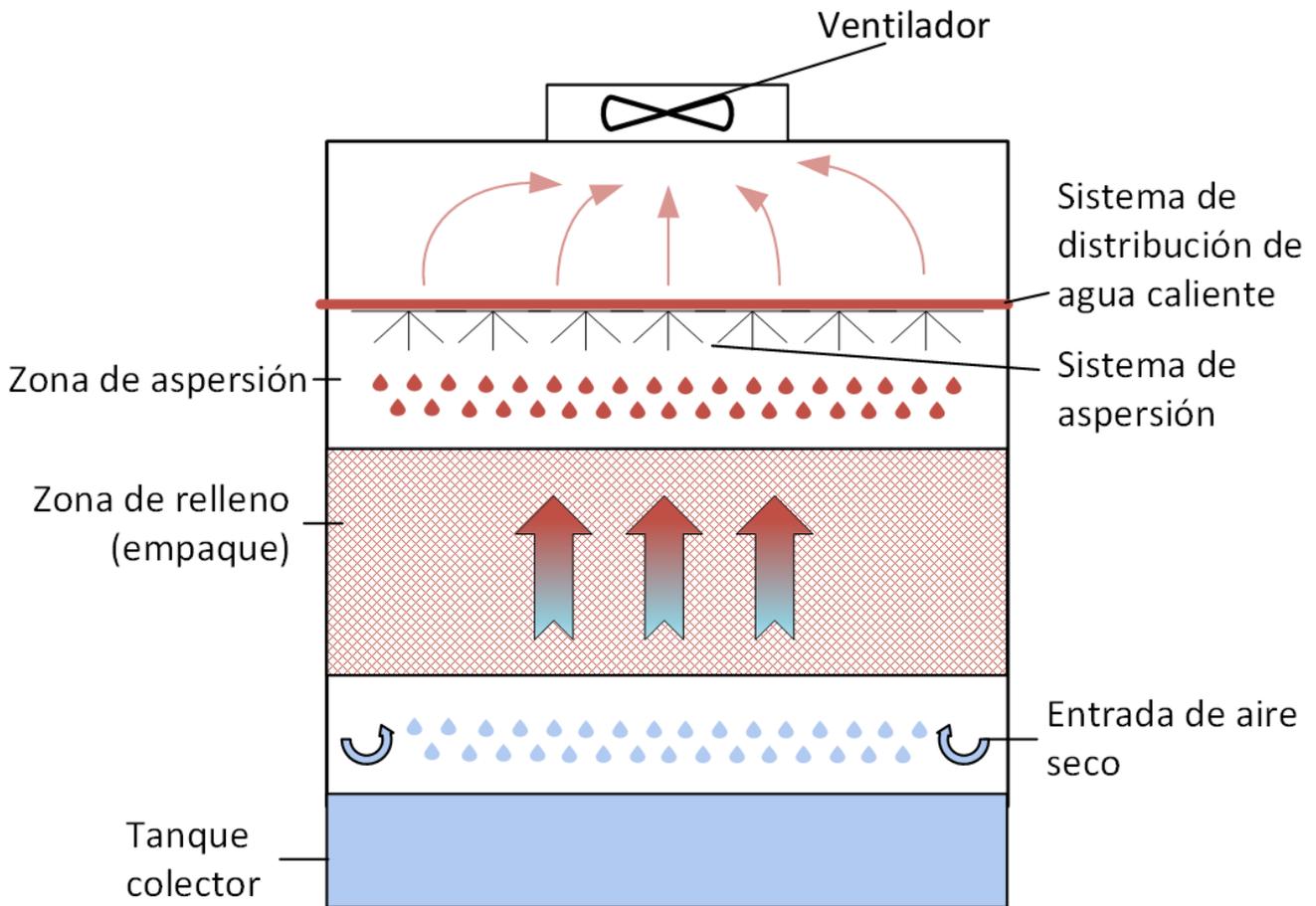
Versión final: 01/11/2025



## Introducción

Las torres de enfriamiento son componentes auxiliares cruciales en muchos sistemas de generación eléctrica y en diversas industrias, como la química, petroquímica, metalúrgica, de refinación y de fertilizantes (Khamis & Hassab, 2014). Su función principal es disipar el calor residual de los procesos térmicos hacia el entorno. Esto se logra mediante el rechazo de calor y la convección entre las gotas de agua y el aire ambiental, lo que permite que una pequeña porción de agua se evapore en el flujo de aire que entra a la torre. En general, el proceso de evaporación de las gotas de agua ha sido objeto de numerosas investigaciones centradas en comprender y caracterizar los fenómenos físicos de transferencia de calor y masa (Klimanek & Białeckki, 2009). Para estudiar tales fenómenos es esencial entender la interacción e influencia entre la fase continua (aire) y la fase dispersa (agua).

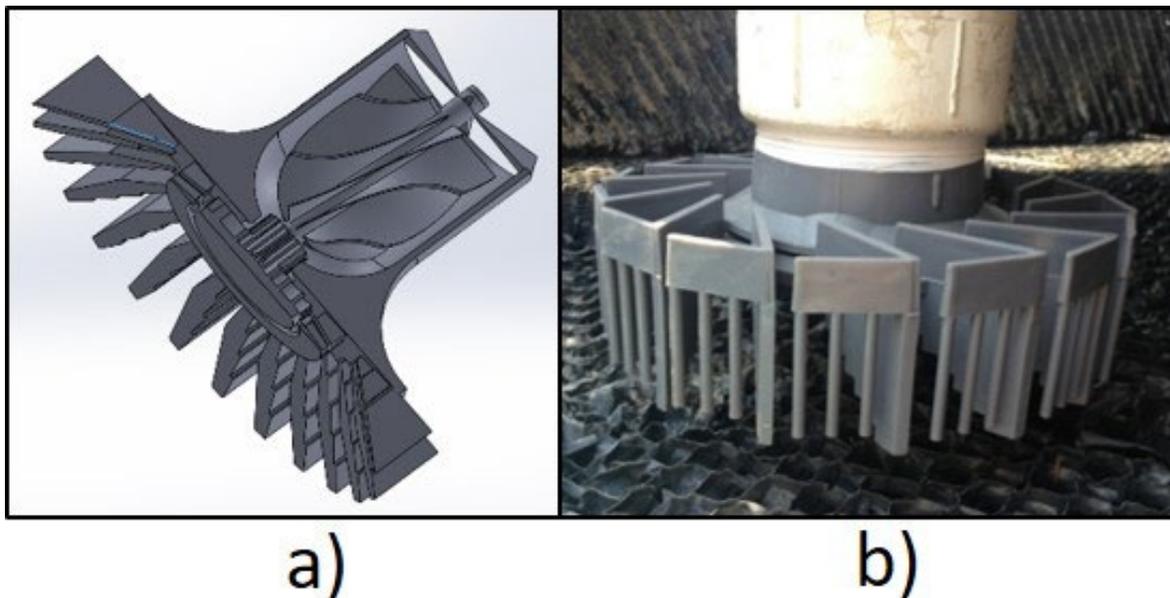
El enfriamiento del agua se logra mediante una combinación de transferencia de calor sensible y latente, lo que provoca la evaporación del agua y el arrastre del fluido, para disipar finalmente el calor hacia la atmósfera. En la Figura 1 se muestra un esquema representativo de una torre de enfriamiento húmeda a contraflujo y sus componentes esenciales, como la zona de relleno, la zona de aspersion, el sistema de distribución de agua caliente, el tanque colector, el sistema de circulación de aire, y las entradas y salidas de aire.



**Figura 1.** Esquema básico de torre de enfriamiento húmeda a contraflujo.

Las torres de enfriamiento húmedas a contraflujo cuentan con tres zonas de interés para comprender su operación y desempeño: zona de aspersión, zona de relleno y zona de lluvia. La zona de aspersión se caracteriza por el sistema de distribución de agua y por lo general consiste en un conjunto de aspersores en línea o una matriz dependiendo de la geometría de la torre (Vitkovic, 2015). Los aspersores de agua son ampliamente utilizados en varias aplicaciones de ingeniería, como control de ductos, extinción de incendios y enfriamiento del núcleo del reactor

nuclear (Zunaid, Murtaza, & Gautam, 2017); el agua se esparce de manera uniforme sobre la superficie del relleno de la torre, para evitar zonas de flujo muertas; los aspersores se encuentran a una separación promedio de 20 cm entre la boquilla del aspersor y el relleno (Collin, Boulet, Parent, & Lacroix, 2007), como se observa en la Figura 2. Existen tres parámetros en el sistema de aspersion que juegan un papel crucial para el enfriamiento: el tamaño de gota, la velocidad de la gota y su flujo volumétrico; además, la correcta distribución espacial del agua influye en la eficiencia operativa de la torre de enfriamiento (Li *et al.*, 2018; Liang & Mudawar, 2017).



**Figura 2.** Aspersor de una torre de enfriamiento: a) propuesta CAD, b) Prototipo instalado.

Parte de las gotas que salen de la zona de aspersion tienden a escapar a gran velocidad por la parte superior de la torre de enfriamiento. Estas pequeñas gotas, conocidas como emisiones por arrastre (bruma),

contienen minerales, bacterias y químicos dañinos que pueden corroer componentes metálicos en las instalaciones. Además, en algunos casos, son responsables de la deposición de sales, formación de hielo (en invierno) y enfermedades como legionelosis (enfermedad del legionario) (Chin, Rosli, Wee, & Ngeow, 2005; Ruiz, Kaiser, & Lucas, 2017). El eliminador de bruma es un dispositivo que remueve las gotas de agua arrastradas por la corriente de aire que sale de la torre de enfriamiento, con lo cual evita que se dispersen en el entorno y se reduce la emisión de contaminantes al medio ambiente. Este dispositivo consiste en un arreglo de rejillas acanaladas por las cuales pasa el flujo de aire circulante, como se muestra en la Figura 3 (Yang, Stratman, & Rasmussen, 2015; Zamora & Kaiser, 2011). El eliminador de bruma requiere limpieza con agua a presión para su mantenimiento, que mejora la efectividad del agua tratada con químicos, previene incrustaciones y reduce riesgos para el entorno (Ruiz *et al.*, 2016).



**Figura 3.** Eliminador de bruma.

La zona de relleno (empaque o empaquetamiento) en una torre de enfriamiento constituye un componente crítico diseñado para maximizar el contacto entre el flujo de agua caliente entrante y la corriente de aire frío ascendente, a fin de promover eficientemente los procesos de transferencia de calor y masa. Esta zona consta de una estructura de elevada área superficial específica, comúnmente fabricada con materiales resistentes a la corrosión y de baja conductividad térmica, tales como plásticos, fibra de vidrio o materiales cerámicos. La configuración del relleno puede presentar diversas geometrías, que incluye láminas onduladas, empaquetamientos de anillos o estructuras de panal de abeja. La altura característica desde el sistema de aspersion hasta la parte superior del relleno es de unos 20 cm, independientemente de la capacidad de la torre de enfriamiento (Qureshi & Zubair, 2006). La diferencia de temperatura entre el agua a la entrada y salida de la torre de enfriamiento se conoce como rango de la torre de enfriamiento (Llano-Restrepo & Monsalve-Reyes, 2017). La eficiencia de transferencia de calor y masa en la torre de enfriamiento depende sobre todo de la capacidad del relleno, ya que en esta zona se lleva a cabo la mayor parte de la transferencia de calor, con lo que se promueve el máximo contacto entre las fases y aumenta el tiempo de residencia del agua dentro de la torre de enfriamiento (El-Wakil, 1985; Hensely, 2011).

Por debajo de la zona de relleno se encuentra la denominada zona de lluvia, que permite un flujo de aire uniforme hacia el relleno. La altura de la zona de lluvia se diseña lo suficientemente grande como para garantizar un flujo de aire uniforme, aunque la mayoría de las torres de enfriamiento no supera los 80 cm. En la zona de lluvia se forman gotas y chorros debido al goteo de agua desde las rejillas del relleno, y el radio

de estas gotas es considerablemente mayor en comparación con las de la zona de aspersión. Sin embargo, una parte significativa de la transferencia total de calor y masa, un aproximado entre el 10 y 20 %, ocurre en la zona de lluvia (Qureshi & Zubair, 2006). Por otro lado, las relaciones existentes para describir estos fenómenos de transporte tienden a ser incorrectos o limitados para un rango muy pequeño en ciertas variables (De-Villiers & Kroger, 1999); algunas investigaciones sobre las características de la zona de lluvia tampoco logran incorporar los efectos de la deformación de las gotas y el desprendimiento de masa (Miura, Miura, & Ohtani, 1977), lo que implica diámetros pequeños en las gotas y números de Reynolds menores a 2 000, o un error alrededor del 12 % en caso de omitir las pérdidas por evaporación (Nahavandi & Serico, 1975).

En la actualidad, se dispone de un amplio abanico de herramientas numéricas que permiten simular los fenómenos de transporte involucrados en la representación del funcionamiento de una torre de enfriamiento. Estas herramientas posibilitan el desarrollo e implementación de nuevas metodologías en los procesos de enfriamiento. Para simular matemáticamente una torre de enfriamiento se requiere la solución simultánea de tres relaciones fundamentales: la ecuación de balance de energía, una relación correspondiente a las características del relleno y una teoría de diseño térmico (Thulukkanam, 2013). Se han llevado a cabo numerosos estudios sobre torres de enfriamiento que trascienden el simple mejoramiento energético de la estructura. Estas investigaciones abordan preocupaciones globales, que incluyen el cambio climático, la dependencia de combustibles fósiles y, de manera más reciente, la escasez de agua (Bauer *et al.*, 2014).

El objetivo de este trabajo es presentar una revisión exhaustiva de las metodologías y estudios existentes orientados a la reducción de las pérdidas de agua por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento a contraflujo. La revisión buscará identificar y analizar de forma crítica las estrategias más efectivas y sostenibles para mitigar este fenómeno y mejorar la eficiencia de estos sistemas de refrigeración industrial. Además, se analizará en profundidad el funcionamiento de las torres de enfriamiento, incluyendo los principios termodinámicos, los fenómenos de transferencia de calor y masa, los modelos matemáticos y numéricos empleados, el uso de herramientas CFD, las técnicas experimentales para la validación de resultados y las aplicaciones relacionadas con el estudio de la evaporación en gotas de agua. Ello permitirá establecer un estado del arte reciente en cuanto las líneas de investigación que pueden derivarse a partir del estudio en torres de enfriamiento enfocado a las pérdidas por evaporación y arrastre. El trabajo está organizado de la siguiente forma: se definen la operación y características de torres de enfriamiento; se abordan las metodologías y estudios más utilizados, desde el enfoque en global de la torre de enfriamiento o su análisis de cada equipo o zona en particular, destacando el modelado numérico, su análisis computacional y su validación experimental, a escala real o escala laboratorio, y los puntos clave destacados por los investigadores en cuanto a suposiciones para llegar a sus resultados; por último se revisan de manera detallada las características particulares para la validación experimental de los modelos numéricos, donde se especifican las dimensiones y geometrías utilizadas a escala laboratorio.

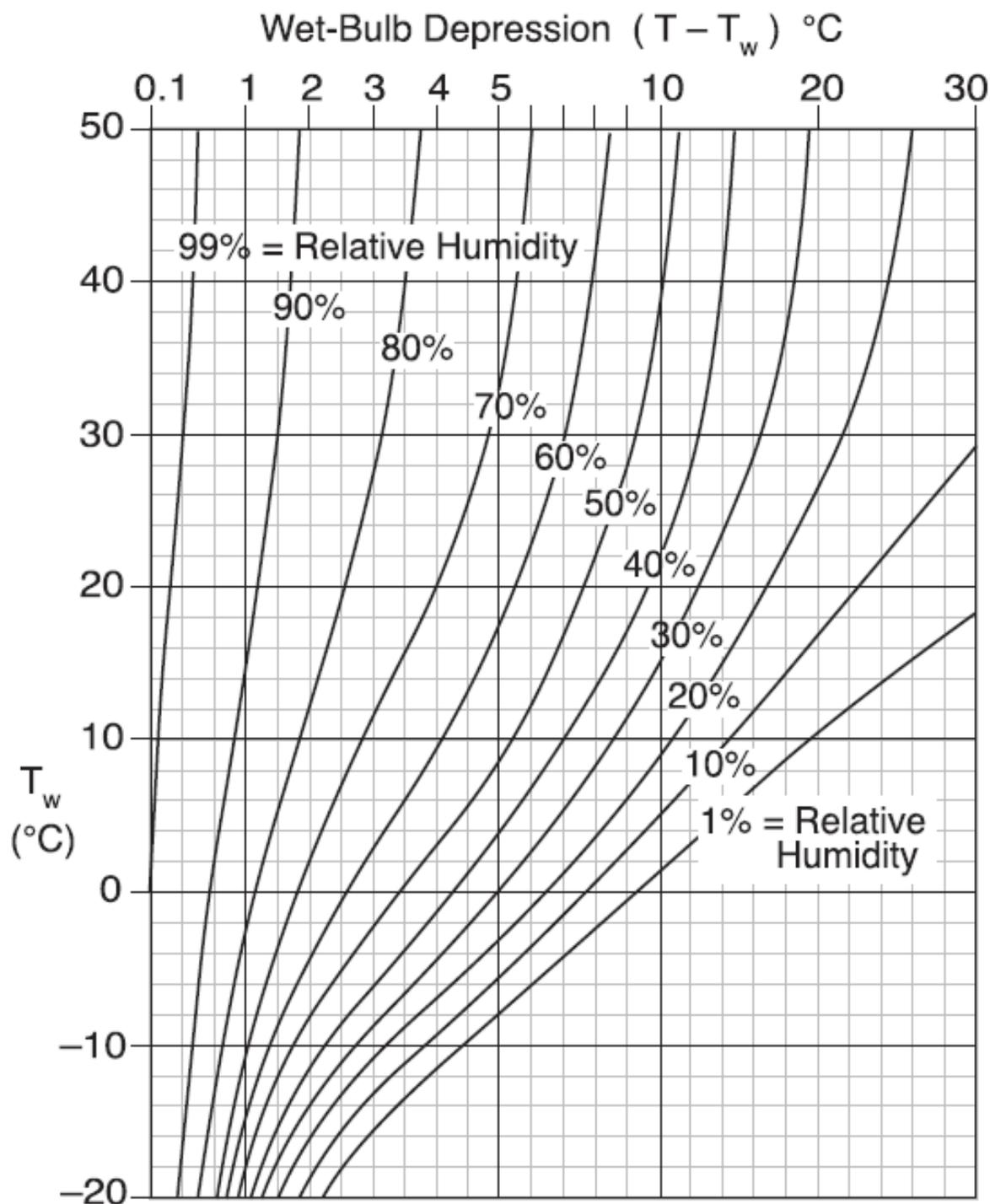
## Efectos de la humedad relativa y temperatura de bulbo seco

Para garantizar un funcionamiento óptimo de las torres de enfriamiento húmedas es importante considerar dos propiedades principales relacionadas con la temperatura del aire: la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo, esta última influenciada por la humedad presente en el aire ambiente, ya que estas propiedades lo determinan.

La disminución de la temperatura del agua variará con la temperatura del punto de rocío ambiente. Cuanto más bajo sea el punto de rocío, mayor será la diferencia de temperatura entre el agua que entra y sale de la torre. Otra regla general para calcular la tasa de evaporación de una torre de enfriamiento es la siguiente: la evaporación equivale a tres galones por minuto por cada 100 "toneladas" de carga de enfriamiento colocada en la torre (DEQ, 2009). El término "tonelada", cuando se utiliza para describir la capacidad de la torre de enfriamiento, equivale a 12 000 Btu por hora de calor eliminado por la torre.

La temperatura de bulbo húmedo desempeña un papel crítico, al establecer el límite para la transferencia de calor entre las fases del proceso y al incrementar las pérdidas de agua debido a la evaporación. Afectada por la humedad en el aire ambiente, dicha temperatura desempeña un papel crítico en el diseño y funcionamiento eficiente de las torres de enfriamiento. Su determinación exacta es esencial para garantizar un rendimiento óptimo en la transferencia de calor y la conservación del agua durante el proceso de enfriamiento, y para la reducción del costo operativo de la torre de enfriamiento debido a la reducción de la masa total de agua evaporada para ciertas condiciones ambientales invernales (Papaefthimiou, Rogdakis, Koronaki, & Zannis,

2012). Lucas, Martínez, Ruiz, Kaiser y Viedma (2010) demostraron que existe una fuerte influencia en la temperatura ambiente en la deposición y dispersión de la deriva en la torre de enfriamiento. La investigación de Stull (2011) proporciona una ecuación para determinar la temperatura del bulbo húmedo en relación con la temperatura del aire y la humedad relativa (%HR). Esta ecuación se obtiene de un ajuste empírico que abarca valores de humedad relativa comprendidos entre el 5 y 99 %, así como temperaturas que oscilan entre -20 y 50 °C, además de los valores resultantes de %HR, los muestra o representan conforme a gráficos similares a la Figura 4 a partir de las ecuaciones implementadas, y pueden ser utilizadas para diferentes presiones de operación.



**Figura 4.** Carta psicrométrica de Stull (2011), válida para presión de 101.325kPa.

## Pérdidas de agua por evaporación y arrastre

La mayoría de las centrales eléctricas utiliza torres de enfriamiento como tecnología preferida debido a su eficiencia, pero su funcionamiento depende de la disponibilidad de agua, por lo que el consumo de agua es un factor importante, pocas veces analizado y cuantificado en estudios relacionados con torres de enfriamiento. El agua utilizada para el enfriamiento en los sistemas de generación de energía eléctrica proviene principalmente de fuentes de agua dulce, tanto superficiales como subterráneas, y su uso tiene un impacto significativo en la disponibilidad de este recurso hídrico. Los modelos analíticos se basan en la implementación de las leyes de conservación de energía y masa, y hacen varias suposiciones sobre la distribución de la temperatura del agua rociada y la pérdida de agua rociada debido a la evaporación (Papaefthimiou *et al.*, 2012).

La cantidad de agua que se reutiliza en los procesos no contribuye al consumo total, pues se recircula y no se extrae del medio ambiente (Bijl, Bogaart, Kram, Vries, & De Vuuren, 2016; Gjorgiev & Sansavini, 2018). En promedio, las centrales eléctricas que funcionan con el ciclo Rankine consumen alrededor de dos litros de agua por kilowatt-hora (l/kWh) de electricidad generada. Las centrales de ciclo combinado, que combinan el ciclo Rankine con una turbina de gas, son más eficientes y consumen unos 1.0 l/kWh (Guerras & Martín, 2020).

Las pérdidas de agua por evaporación en las torres de enfriamiento representan una cantidad significativa del consumo de agua, la tasa de evaporación es de aproximadamente el 1.0 % del caudal de agua por cada  $\Delta T$  de 10 °F (5.6 °C) de rango de enfriamiento (DEQ, 2009). Las torres

de enfriamiento experimentan pérdidas de agua a través de varios mecanismos, que incluyen la evaporación, la purga y el arrastre, es decir, se debe tener agua de reposición para compensar dichas pérdidas (Shublaq & Sleiti, 2020).

Los eliminadores de deriva (separador de gotas) desempeñan un papel importante en el funcionamiento de las torres de enfriamiento. Cuando el aire caliente y húmedo es expulsado por la parte superior de la torre, mientras que el agua enfriada se recoge en la zona de lluvia, es posible que pequeñas gotas de agua sean transportadas por la corriente de aire, y si el separador de gotas no es eficaz en su captura, se produce lo que se conoce como pérdidas de arrastre. Estos dispositivos operan modificando la dirección del flujo de aire a medida que atraviesa la sección del eliminador (Figura 5), lo que facilita la separación de la mayoría de las gotas arrastradas de la corriente de aire y permiten que vuelvan a caer dentro de la unidad. La eficacia de los eliminadores de gotas se puede medir mediante dos parámetros principales: la eficiencia de recolección de gotas y la caída de presión a través del eliminador (Ruiz *et al.*, 2019).



**Figura 5.** Eliminadores de deriva (separador de gotas).

La eficiencia de recolección se define por lo general como la relación entre la masa de agua recolectada por el separador y la masa de agua total que ingresa al separador de gotas. Un diseño adecuado del separador de gotas debe garantizar una alta eficiencia de recolección de gotas y mantener al mismo tiempo la caída de presión a un valor mínimo (González-Pedraza, Pacheco-Ibarra, & Rubio-Maya, 2015).

Investigaciones sobre los separadores de gota proponen mejoras en la estructura interna para lograr una mayor eficiencia de separación y al mismo tiempo reducir la pérdida de presión; caracterizar varios tipos de eliminadores de gotas comerciales (Zamora & Kaiser, 2011); proporcionar pautas generales para desarrollar criterios de selección basados en los números adimensionales que gobiernan el problema físico, ya sea por medio de modelación matemática computacional (Meroney, 2006; Song,

Wu, & Song, 2021) y su evaluación de manera experimental (Lucas, Martínez, & Viedma, 2012; Yu *et al.*, 2021). Naik y Muthukumar (2017) desarrollaron una expresión para estimar la pérdida de evaporación del agua en una torre de enfriamiento húmeda en términos de los parámetros de entrada conocidos, que mostró concordancia con datos experimentales. Este enfoque proporciona una herramienta útil para la predicción y comprensión del comportamiento de la torre de enfriamiento bajo diversas condiciones operativas.

En la actualidad, el nexo energía-agua desempeña un papel crucial, si se considera que el sector energético consume agua directamente en la generación de electricidad (Li, Feng, Siu, & Hubacek, 2012; Lu & Chen, 2016). El sector energético representa un 15 % del consumo total de agua en el mundo (Li *et al.*, 2017). Las torres de enfriamiento consumen grandes cantidades de agua, por lo que la disponibilidad del recurso se ve afectada por los efectos del cambio climático global, el aumento de la población y la implementación de regulaciones ambientales cada vez más estrictas (Murrant, Quinn, Chapman, & Heaton, 2017; Srinivasan *et al.*, 2018). Ante la creciente demanda de generación de electricidad en un contexto de disminución de la disponibilidad de agua para el enfriamiento en las centrales eléctricas, ha surgido un interés en reducir las pérdidas de agua debidas a la evaporación y el arrastre (González-Pedraza, Pacheco-Ibarra, Rubio-Maya, Galván-González, & Rangel-Arista, 2018; Taghian & Ahmadikia, 2017).

## Materiales y métodos

En el ámbito del estudio de torres de enfriamiento se han empleado diversos enfoques, que parten desde su análisis energético global o centradas en las áreas clave de las torres de enfriamiento (Chen, Sun, & Lyu, 2019; Goshayshi & Missenden, 2000; Kachhwaha, Dhar, & Kales, 1998; Lemouari, Boumaza, & Kaabi, 2011; Ramkrishnan & Arumugam, 2013; Sun, Guan, Gurgenci, Li, & Hooman, 2017; Tomás *et al.*, 2018). El estudio de Merkel (1925) ha sido primordial en el análisis de los procesos de transferencia de calor y masa. Su trabajo estableció los fundamentos matemáticos para mejorar el rendimiento de las torres de enfriamiento. Además, sus hallazgos han sido aplicados en otras investigaciones para perfeccionar ecuaciones o desarrollar correlaciones más precisas con el objetivo de mejorar el desempeño energético y reducir las pérdidas por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento (Baker & Shryock, 1961; Jaber & Webb, 1989; Kloppers, 2003; Kloppers & Kröger, 2005; Gharagheizi, Hayati, & Fatemi, 2007; Qi, Liu, & Li, 2007; Heidarinejad, Karami, & Delfani, 2009; Picardo & Variyar, 2012; González-Pedraza *et al.*, 2015).

La Tabla 1 muestra las investigaciones que comparten el objetivo de optimizar alguno de los componentes internos de la torre de enfriamiento húmeda; se puede apreciar que cada una de las zonas de interés aporta en lo individual a la mejora del rendimiento: en función de la velocidad de pulverización; la distribución del agua en su recorrido por la torre de enfriamiento; el diseño y la optimización de las boquillas de los aspersores; la distribución de los materiales utilizados en el relleno;

la distribución del diámetro de las gotas, y el impacto de la velocidad del aire a contraflujo, a través de un enfoque teórico y experimental.

**Tabla 1.** Estudios enfocados a zonas en torres de enfriamiento.

Autor	Zona	Resultados clave
Li <i>et al.</i> (2018)	Aspersión/multizona	Analizaron el impacto de la velocidad de pulverización y la distribución del agua en las tres zonas dentro de la torre de enfriamiento y su influencia en la reducción de la temperatura del agua de salida. Además, exploraron la relevancia de la velocidad del aire en la zona de lluvia y el relleno para comprender su interacción en el proceso de enfriamiento
Kachhwaha <i>et al.</i> (1998)	Aspersión	Realizaron pruebas experimentales para verificar el rendimiento de las boquillas empleadas en los aspersores para la distribución del agua; utilizaron un túnel de viento como medio de experimentación
Sun <i>et al.</i> (2017)	Aspersión	Determinaron la distancia óptima entre dos boquillas y evaluaron el efecto del enfriamiento en función del número de boquillas, su ubicación óptima y la dirección de inyección en el sistema de aspersión. Además, desarrollaron una correlación entre la eficiencia de enfriamiento y variables adimensionales
Tomás <i>et al.</i> (2018)	Relleno	Compararon el rendimiento de la torre de enfriamiento utilizando materiales alternativos en el empaque, como fibra de coco y botellas de plástico PET. Los resultados demostraron una eficiencia satisfactoria sin un incremento en el consumo de energía de la torre de enfriamiento

Autor	Zona	Resultados clave
Lemouari <i>et al.</i> (2011)	Relleno	Realizaron un estudio experimental para analizar las características hidráulicas de una torre de enfriamiento, usando un relleno tipo VGA (Vertical Grid Apparatus). La investigación resalta las correlaciones obtenidas entre los parámetros operativos, tales como los flujos máxicos de aire y agua, junto con la temperatura de entrada del agua, con lo que sería interesante ampliar su estudio en torres de enfriamiento de mayor tamaño y condiciones operativas más elevadas
Chen, Sun y Lyu (2019)	Lluvia	Realizaron un estudio cuantitativo sobre la distribución del diámetro de las gotas en torres de enfriamiento húmedas, e investigaron el efecto que produce la variación en la velocidad del flujo cruzado de aire sobre la relación numérica de las gotas
Ramkrishnan y Arumugam (2013)	Relleno	Elaboraron un estudio experimental con un relleno curvado para determinar los parámetros que afectan la efectividad de una torre de enfriamiento
Goshayshi y Missenden (2000)	Relleno	Examinaron de forma un experimental cómo afecta la transferencia de masa y la caída de presión el uso de empaques corrugados de PVC, los cuales presentaban superficies lisas o rugosas

Otra perspectiva en la mejora del desempeño en torres de enfriamiento a contraflujo es la evaluación del funcionamiento mediante modelación matemática computacional y la simulación de sistemas existentes bajo ciertas condiciones operativas, o al realizar cambios en el diseño para predecir su funcionamiento y evaluar su rendimiento. La validación de un modelo matemático computacional se lleva a cabo

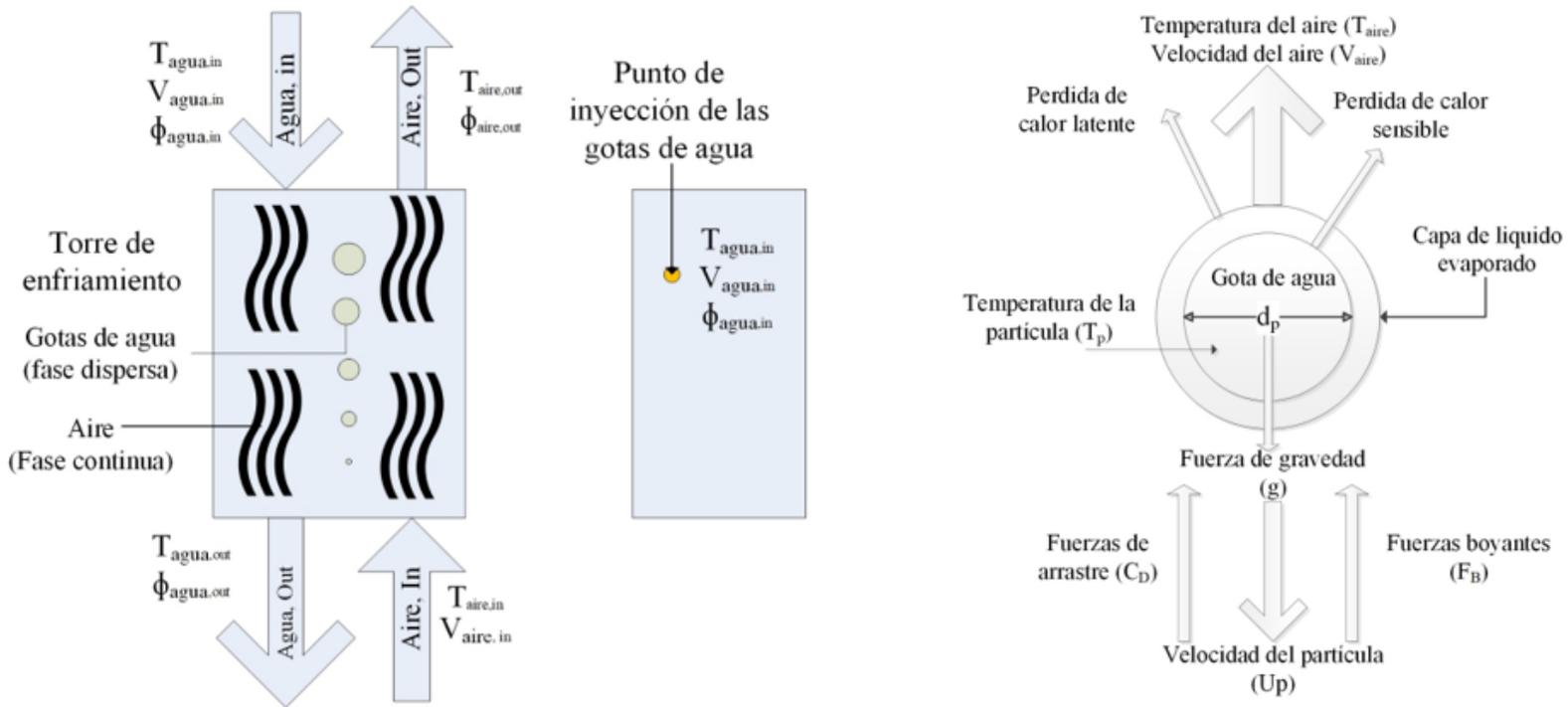
mediante experimentos de campo, a escala real o de laboratorio. Además, los datos obtenidos permiten hacer un análisis de sensibilidad para determinar cómo cambian los resultados del modelo cuando se modifican ciertos parámetros, lo que ayuda a identificar los factores que más influyen en el rendimiento de la torre de enfriamiento.

## Modelado analítico y análisis energético

En el estudio del rendimiento de las torres de enfriamiento se desarrolla un modelo matemático confiable con las ecuaciones de conservación para la transferencia de masa, momento y energía; además de un modelo físico que exprese los fenómenos asociados de resistencia al flujo de aire, la transferencia de calor y masa entre las fases de aire y agua.

Los marcos de referencia para el estudio de flujos bifásicos pueden ser abordados desde dos enfoques principales: el marco de referencia Euleriano-Lagrangiano y el marco de referencia Euleriano-Euleriano (González-Pedraza *et al.*, 2018). De acuerdo con la investigación de González-Pedraza *et al.* (2018), en el estudio de fenómenos evaporativos en gotas de agua, el marco de referencia Lagrangiano permite la modelación de la caída de gotas de agua; la formación de una película de líquido subenfriado alrededor de estas durante su fusión (lo que aumenta su diámetro); la trayectoria seguida por las partículas hasta su fusión, y el tiempo de fusión de la partícula. Este enfoque implica una aproximación matemática al modelo de dos corrientes: agua y aire, que fluyen en direcciones opuestas. En la Figura 6 se muestran las variables que más influyen en un esquema Euleriano-Lagrangiano en el análisis de los fenómenos evaporativos en gotas de agua para ambas corrientes de

fluido, de las que destacan: la temperatura, la velocidad y la humedad relativa.



**Figura 6.** Esquema Euleriano-Lagrangiano en el estudio de los fenómenos evaporativos en una gota de agua (González-Pedraza *et al.*, 2018).

De acuerdo con el estudio de González-Pedraza (2017), una forma de abordar el estudio de fenómenos evaporativos en una gota de agua consiste en resolver una ecuación de trayectoria en un marco de referencia Lagrangiano, originando una ecuación diferencial que se fundamenta en la segunda ley de Newton del movimiento. Esta ecuación describe todas las fuerzas que influyen en el movimiento de las partículas, como la fricción o arrastre, las fuerzas de flotación, las fuerzas inerciales y la naturaleza estocástica de la turbulencia. Además, es necesario

considerar el intercambio de energía asociada con el cambio de fase que se experimenta durante su trayectoria como fase continua. Esto se modela al resolver una ecuación para determinar el cambio de temperatura de la partícula debida a la evaporación de masa en la gota de agua por efecto del aire circundante.

González-Pedraza (2017) también indica que es necesario resolver las ecuaciones de continuidad y conservación de energía tanto para la fase dispersa (las gotas de agua) y la fase continua, (que es el aire) como para las ecuaciones de turbulencia de Navier-Stokes en un marco de referencia Euleriano-Euleriano. Este enfoque implica un tiempo de cómputo considerable para su resolución, pero permite analizar desde la formación de la gota hasta las deformaciones que experimenta al pasar por el volumen de control, así como los desprendimientos de masa debidos a la tensión superficial. En otras palabras, este método estudia el flujo a partir de un volumen de control fijo, y considera la cantidad de flujo que entra y sale del mismo.

## Solución del modelo Euleriano-Lagrangiano

Para presentar el modelo matemático y las ecuaciones gobernantes de los fenómenos involucrados en la transferencia de masa y calor de gotas agua a contraflujo, se debe partir de la ecuación general de conservación de cualquier propiedad, expresada por la Ecuación (1), que representa de manera general los fenómenos de conservación (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2006):

$$\nabla \cdot \Gamma_{\varphi} \nabla \varphi - \nabla \cdot (\rho \vec{u} \nabla \varphi) + S_{\varphi} = \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} \quad (1)$$

El primer término del lado izquierdo de la Ecuación (1) representa el término difusivo; el segundo corresponde al término convectivo, y el último término de lado izquierdo de la ecuación es el término fuente. Del lado derecho de la ecuación se encuentra el término transitorio (acumulación) y  $\varphi$  es la propiedad a analizar. Por ejemplo, la ecuación de conservación de masa —o continuidad de acuerdo con lo anterior— se presenta en la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (2)$$

La Ecuación (2) representa la forma general de la ecuación de conservación de masa y es válida tanto para flujos compresibles como incompresibles. Donde  $S_m$  es el término fuente a evaluar; el primer término del lado izquierdo de la ecuación es la acumulación de masa en el sistema, y el segundo término es el término convectivo.

Por otro lado, la ecuación de conservación de momentum para ambas fases está compuesta de los siguientes elementos: término transitorio o de acumulación de momentum (RANS); el término de transporte de momento convectivo; término de esfuerzos de Reynolds; término de presión; término de transporte de momento difusivo o viscoso; las fuerzas de cuerpo, y el término fuente, en el cual se pueden introducir fuerzas externas, como se muestra en la Ecuación (3):

$$\frac{D}{Dt} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + \vec{F} \quad (3)$$

Otro elemento a tomar en cuenta en el modelo matemático es la ecuación de energía, como se muestra en la Ecuación (4):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + \rho)) = \nabla \cdot (\vec{k}_{eff} \nabla T) - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) + S_h \quad (4)$$

Los términos asociados con la ecuación de energía constan de la transferencia de energía debido a la conducción y disipación viscosa. Los términos de conductividad efectiva ( $\vec{k}_{eff}$ ) consideran los términos de conductividad térmica turbulenta, en función del modelo de turbulencia usado. El último término del lado derecho en la Ecuación (4) representa el calor generado por reacciones químicas, fuentes de generación o disipación de calor, y cualquier otra fuente definida por el usuario.

En cuanto a los modelos de turbulencia, González-Pedraza (2017) considera el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  estándar. Este modelo se basa en un enfoque semiempírico que utiliza ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta ( $\kappa$ ) y su tasa de disipación ( $\epsilon$ ), que se obtienen a través de razonamientos físicos. En la formulación del modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$  estándar, se asume que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. Por lo tanto, el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  estándar es válido solamente para flujos turbulentos. Las ecuaciones (5) y (6) muestran el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$  estándar, que representa la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad y flotabilidad:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_\kappa \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Cabe señalar que las constantes  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$ , mostradas en la Ecuación (6), dependen del modelo de la viscosidad turbulenta  $\mu_t$ , como se muestra en la Ecuación (7):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Donde  $C_\mu$  también es un valor constante, y para este modelo de viscosidad turbulenta las constantes pueden tomar los valores listados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valor para las constantes del modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  (González-Pedraza, 2017).

Constante	$C_1$	$C_2$	$\sigma_\kappa$	$\sigma_\varepsilon$	$C_\mu$
Valor	1.44	1.92	1.0	1.3	0.09

En la modelación de gotas de agua en caída libre con aire a contraflujo, las ecuaciones Lagrangianas se resuelven de tal forma que describen el comportamiento en función de la posición velocidad, masa y temperatura de la partícula. Esta consideración puede llevar un error al momento en que la gota intercambia calor y momentum con la fase líquida, por lo que las ecuaciones Lagrangianas deben incluir los mecanismos de transporte mencionados entre las dos fases y el cambio

de diámetro que sufren las partículas. La Ecuación (8) representa la formulación del modelo Euleriano, que incluye los mecanismos de transporte a los términos fuente para ambas fases, como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_c \varphi_c) + \nabla \cdot (\vec{u}_c \rho_c \varphi_c) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi_c) = S_\varphi + S_{\varphi G} \quad (8)$$

En resumen, y de acuerdo con González-Pedraza (2017), para llegar a la solución del modelo matemático aplicado a gotas de agua debe considerarse la siguiente secuencia:

1. Calcular el paso de tiempo Lagrangiano
2. Calcular el movimiento de la partícula
3. Calcular las propiedades de la partícula en la nueva posición
4. Calcular las fuentes de interface

La Ecuación (9) es la representación vectorial de la posición y el cálculo de la velocidad instantánea de la partícula:

$$\frac{dx_p}{dt} = \vec{u}_p \quad (9)$$

En esta forma, la ecuación de momento de la partícula se define así:

$$m_p \frac{\vec{u}_p}{dt} = D_p(\vec{u} - \vec{u}_p) + m_p b g - V_p \nabla_{Pr} \quad (10)$$

Partiendo de la segunda ley de movimiento de Newton, la Ecuación (10) expresa la velocidad de cambio de momentum en conjunto con la gota; por otro lado, los términos a la derecha de la Ecuación (10) corresponden a las fuerzas que actúan sobre la gota, como el arrastre, la flotabilidad y las asociadas a la fase continua. En el modelo de turbulencia, se asume que la gota es afectada por los remolinos presentes en un fluido, remolinos denominados también como Eddys. El movimiento de la gota es afectado por la velocidad  $\vec{u}$  de la fase continua en la ecuación de movimiento de la partícula descrita por la Ecuación (11):

$$\vec{u}_c = \vec{u} - \vec{u}'_c \quad (11)$$

González-Pedraza (2017) indica que el campo de velocidades fluctuantes  $\vec{u}_c$  es obtenido simplificando cada componente, una distribución normal con una media de 0.0 y una desviación estándar de  $(2/3 \kappa)^{1/2}$ , donde  $\kappa$  es el valor de la energía cinética turbulenta. La función de arrastre  $D_p$  sobre la gota de agua es representada por la Ecuación (12):

$$D_p = \frac{1}{2} \rho A_p C_D (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (12)$$

Para determinar el valor del coeficiente de arrastre del aire sobre la partícula se utiliza la correlación aportada por Clift, Grace y Weber (1978):

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) + \frac{0.42}{1.425 \times 10^4 Re^{-1.16}} \quad (13)$$

Por otro lado, la evolución de la masa de la partícula,  $m_p$  (Sánchez, Kaiser, Zamora, Ruiz, & Lucas, 2015) está descrita por la Ecuación (14), que es la ecuación de conservación de masa, en función del cambio de diámetro y propiedades de conductividad térmica y capacidad calorífica:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p \frac{k_v}{C_{pv}} Nu \cdot \ln(1 + B_M) \quad (14)$$

El número de Nusselt ( $Nu$ ) mide el aumento de la transferencia de calor por convección, comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción, y se define mediante la Ecuación (15):

$$Nu = 2(1 + 0.3Re^{0.5}Pr^{0.33})F \quad (15)$$

La descripción más adecuada del espesor relativo de las capas límite de velocidad laminar en la fase continua se realiza mediante el número de Prandtl adimensional. Este parámetro se define como el cociente entre la difusividad del momento y la difusividad térmica. El factor de corrección  $F$  para la transferencia de masa propuesto por Frossling (Bolot, Li, & Coddet, 2004) de la Ecuación (15) se calcula por medio de la Ecuación (16):

$$F = \frac{1}{B_M} \ln(1 + B_M) \quad (16)$$

La Ecuación (16) depende del número de transferencia de masa  $B_M$ , que representa las fuerzas que actúan en el proceso de transferencia entre la gota de agua y el aire circundante, y se calcula mediante la Ecuación (17):

$$B_M = \left[ \frac{Y_{VS} - Y_{V\infty}}{1 - Y_{VS}} \right] \quad (17)$$

El lado derecho de la Ecuación (17) muestra la interacción entre la fracción de vapor de masa entre la superficie de la gota y la fracción de masa vapor en gas que rodea la gota. La fracción de masa de vapor en la superficie de la gota de agua se calcula con la Ecuación (18):

$$Y_{VS} = \left[ 1 + \left( \frac{P}{P_{VS}} - 1 \right) \frac{W_C}{W_V} \right]^{-1} \quad (18)$$

Por otro lado, el intercambio de energía entre la gota de agua y el aire circundante se describe en la Ecuación (19):

$$C_{p_p} \cdot m_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = H_{fg} \frac{dm_p}{dt} + \alpha(T_v - T_p) \quad (19)$$

El lado izquierdo de la Ecuación (19) muestra cómo se intercambia y acumula la energía en la gota. En el lado derecho, el primer término se

refiere al calor latente causado por la evaporación o la pérdida de masa de la gota de agua, mientras que el segundo término representa el intercambio de calor sensible entre la fase continua y la fase dispersa, lo cual se debe a la diferencia de temperatura por enfriamiento y la velocidad del aire. Según el término fuente  $S_m$  de la ecuación de conservación de masa, la variación de la masa de la gota se calcula por la Ecuación (20):

$$S_m = \frac{\Delta m_p \dot{m}_{ip}}{m_{ip} dV} \quad (20)$$

La Ecuación (20) relaciona el cambio inicial de masa de la gota en cada volumen diferencial en un flujo másico inicial de gotas inyectadas. Por lo tanto, para calcular el cambio de masa en cada elemento diferencial para la fase continua se emplea la Ecuación (21):

$$\Delta m_p dV = N_v M_v A_p dt \quad (21)$$

La Ecuación (21) relaciona el flujo molar, el peso molecular del vapor y el área de la gota. El flujo molar de vapor es función de la concentración de vapor en la superficie de la gota, la concentración de vapor en la fase continua y el coeficiente de transferencia de masa  $K_c$ ; dichas relaciones se muestran en las ecuaciones (22) a (24):

$$N_v = K_c (C_{v,s} - C_v) \quad (22)$$

$$K_c = \frac{Nu(D_{v,m})}{d_p} = \frac{(2+0.6 \cdot Re^{1/2} Sc^{1/3}) D_{v,m}}{d_p} \quad (23)$$

$$C_{v,s} = \frac{p_{v,s}(T_p)}{R(T_p)} \quad C_{v,s} = \frac{px_v}{RT} \quad (24)$$

Se observa en la Ecuación (23) que el coeficiente de transferencia de masa depende del número de Nusselt, que a su vez puede obtenerse mediante la correlación dada por Ranz y Marshall (1952). Por último, los términos fuente utilizados en las ecuaciones (3) y (4) para la cantidad de movimiento y energía se pueden calcular por las ecuaciones (25) y (26):

$$\vec{F} = \left[ \frac{3\mu C_D Re}{4\rho_p d_p^2} (\vec{u} - \vec{u}_p) + g \left( \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) + \frac{\rho}{\rho_p} \vec{u}_p \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_p} \right] \frac{\dot{m}_{p0} dt}{dV} \quad (25)$$

$$S_h = \left[ \left( \frac{\bar{m}_p}{m_{p0}} C_p \Delta T_p \right) + \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \left( -h_f + \int_{T_{ref}}^{T_p} C_{p,i} dT \right) \right] \frac{\dot{m}_{p0}}{dV} \quad (26)$$

Las ecuaciones (25) y (26) describen el cambio promedio de la masa de la partícula y cuánto fue el cambio de la temperatura en un diferencial de volumen dado (Lucas *et al.*, 2010). Por último, se debe cuidar el uso de la suposición de la esfericidad de la gota de agua. Araneo (2012) indica que las gotas de agua pueden considerarse como cuerpos esféricos para un número de Weber menor o igual a 1, que puede calcularse con la Ecuación (27):

$$We = \frac{\rho_a \vec{u}^2 d_p}{\sigma_w} \quad (27)$$

En el estudio de González-Pedraza *et al.* (2018) se encontró que números de Weber son consistentes con la suposición de esfericidad en gotas de agua: con un diámetro de 3 mm y una velocidad de 4 m/s, el número de Weber es de 0.79; por otro lado, para gotas de 0.1 mm y velocidad de 10 m/s, el número de Weber es 0.1658. También analizó un caso crítico, donde el diámetro de gota de 10 mm y velocidad de 2.4 m/s daba un número de Weber de 0.95. Por lo tanto, González-Pedraza *et al.* (2018) concluye que la forma esférica de las gotas es una suposición aceptable.

Kloppers y Kröger (2005) abordaron en un estudio la importancia del factor de Lewis y la razón de que tenga un valor de 1 para la simplificación de las ecuaciones gobernantes en los procesos de transferencia de calor y masa; aclaran también el error común entre los investigadores que se refieren al número de Lewis,  $Le$ , como el factor de Lewis,  $Le_f$ . Mencionan que el número de Lewis deriva de los números de Prandtl ( $Pr$ ) y Schmidt ( $Sc$ ). En sistemas donde ocurren transferencias simultáneas de calor y momento por convección, la relación entre  $\nu$  y  $\alpha$  es significativa, y se denomina número de Prandtl, como se muestra en la Ecuación (28):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (28)$$

Donde:

$\nu$  = viscosidad cinemática

$\alpha$  = coeficiente de difusividad térmica

$c_p$  = calor específico a presión constante

$\mu$  = viscosidad dinámica

$k$  = conductividad térmica

Kloppers y Kröger (2005) mencionan que en los procesos que implican transferencia simultánea de momento y masa, el número de Schmidt se define como la relación entre  $\nu$  y  $D$  (coeficiente de difusión), como se muestra en la Ecuación (29):

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (29)$$

En procesos que involucran transferencia simultánea de calor y masa por convección, la relación entre  $\alpha$  y  $D$  se define como el número de Lewis, como se muestra en la Ecuación (30):

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{k}{\rho c_p D} = \frac{Sc}{Pr} \quad (30)$$

Esta relación es relevante para la transferencia convectiva simultánea de calor y masa. La tasa relativa de crecimiento de las capas límite térmicas y de concentración está determinada por el número de Lewis. Los perfiles de temperatura y concentración coincidirán cuando  $Le = 1$ .

Por otro lado, el factor de Lewis,  $Le_f$ , proporciona una indicación de las tasas relativas de transferencia de calor y masa en un proceso de evaporación (Kloppers & Kröger, 2005). El factor de Lewis,  $Le_f$ , es igual a la relación entre el número de Stanton de transferencia de calor,  $St$ , y el

número de Stanton de transferencia de masa,  $St_m$ . Estos números adimensionales están dados por las ecuaciones (31) y (32):

$$St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{h}{\rho u c_p} \quad (31)$$

$$St_m = \frac{Sh}{ReSc} = \frac{h_m}{\rho u} \quad (32)$$

Donde:

$Nu$  = número de Nusselt o flujo de calor adimensional

$Sh$  = número de Sherwood o flujo de masa adimensional

El factor de Lewis  $Le_f$  se puede obtener dividiendo la Ecuación (31) entre la Ecuación (32), como sigue:

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \frac{h}{\rho c_p D} \frac{\rho u}{h_m} = \frac{h}{c_p h_m} \quad (33)$$

Además, esta misma relación puede conducir a que el factor de Lewis se pueda calcular en función del número de Lewis, como se muestra en la Ecuación (34):

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{-2/3} = Le^{2/3} \quad (34)$$

Kloppers y Kröger (2005) mencionan que el valor del factor de Lewis está en un rango de 0.5 a 1.3. Además, la tasa de evaporación del agua

depende en gran medida del factor Lewis tanto para las torres de enfriamiento de tiro natural como para las de tiro mecánico. Por último, los autores mencionan que el factor Lewis se puede ajustar para representar las tasas de evaporación medidas físicamente y las temperaturas del aire de salida con mayor precisión en los análisis del rendimiento del relleno de la torre de enfriamiento.

El modelado de turbulencia basado en el promedio de Reynolds requiere que las tensiones de Reynolds de la Ecuación (36) se modelen adecuadamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (35)$$

Por lo general se emplea la hipótesis de Boussinesq (Fluent ANSYS, 2013) para relacionar las tensiones de Reynolds con los gradientes de velocidad media, como se expresa en la Ecuación (36):

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho \kappa + \mu_t \frac{\partial u_\kappa}{\partial x_\kappa} \right) \delta_{ij} \quad (36)$$

La hipótesis de Boussinesq es utilizada en los modelos de Spalart-Allmaras, en los modelos de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$  y  $\kappa$ - $\omega$ . Una de las ventajas en este enfoque es el costo computacional relativamente bajo asociado con el cálculo de la viscosidad turbulenta,  $\mu_t$  (Fluent ANSYS, 2013).

El modelo de Spalart-Allmaras solo resuelve una ecuación de transporte adicional (que representa la viscosidad turbulenta). Sin embargo, los modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  y  $\kappa$ - $\omega$  resuelven dos ecuaciones de transporte

adicionales (para la energía cinética de la turbulencia,  $\kappa$ , y la tasa de disipación de la turbulencia,  $\varepsilon$ , o la tasa de disipación específica,  $\omega$ ), y  $\mu_t$  se calcula como una función de  $\kappa$  y  $\varepsilon$  o  $\kappa$  y  $\omega$ .

Por otro lado, la hipótesis de Boussinesq tiene la desventaja en suponer que  $\mu_t$  es una cantidad escalar isotrópica (mismas propiedades en todas las direcciones), lo que no es estrictamente cierto. Sin embargo, la suposición de una viscosidad turbulenta isotrópica suele funcionar bien para flujos cortantes dominados por solo una de los esfuerzos de corte turbulentos. En consecuencia, un enfoque alternativo integrado en el modelo de esfuerzo de Reynolds (RSM) consiste en resolver ecuaciones de transporte para cada uno de los términos del tensor de esfuerzo de Reynolds. Además, se requiere una ecuación adicional que determine la escala (normalmente para  $\varepsilon$  o  $\omega$ ). Esto significa que se requieren cinco ecuaciones de transporte adicionales en flujos 2D y siete ecuaciones de transporte adicionales que deben resolverse en 3D. En muchos casos, los modelos basados en la hipótesis de Boussinesq funcionan muy bien y el consumo computacional adicional del modelo de tensión de Reynolds no está justificado. En cambio, el modelo RSM es claramente superior en situaciones en las que la anisotropía de la turbulencia tiene un efecto dominante en el flujo. Tales casos incluyen flujos muy arremolinados y flujos secundarios impulsados por la tensión (Fluent ANSYS, 2013).

## Resultados

En cada una de las investigaciones realizadas sobre estudios numéricos y matemáticos es común encontrar que cada investigador desarrolla un modelo matemático para un tipo específico de torre de enfriamiento. Estos modelos suelen basarse en el estudio pionero de Merkel (1925) y

hacen suposiciones que simplifican la solución de los modelos numéricos, con lo que procura reducir el porcentaje de error al compararlos con los datos experimentales. A partir de las investigaciones y consideraciones de Merkel, Jaber y Webb (1989) utilizaron el método del número de unidades de transferencia efectiva ( $\epsilon$ -NTU) para evaluar el desempeño en torres de enfriamiento de contraflujo o flujo cruzado.

Merkel (1925) desarrolló su teoría relacionando los fenómenos de evaporación y transferencia de calor sensible entre el contacto de agua y una corriente de aire a contraflujo presentes en torres de enfriamiento. El punto central de esta teoría es la expresión del número de transferencia de unidades (NTU) como una función integral de la diferencia de temperatura dividida por el gradiente de entalpía; para poder resolver las ecuaciones diferenciales que involucran la transferencia de masa y calor, Merkel utilizó las siguientes consideraciones para simplificar el problema:

- La capa de aire saturado tiene la misma temperatura que el agua.
- La capa de aire saturado presenta poca resistencia a la transferencia de calor.
- El contenido de vapor del aire es proporcional a la presión parcial del vapor de agua.
- La presión del vapor dentro de la torre de enfriamiento es bastante baja, por lo que su impacto en la presión operativa de la torre es prácticamente insignificante.
- El flujo de calor del aire a la capa por convección es proporcional al flujo de calor de la capa al aire ambiente por evaporación.
- El calor específico constante de la mezcla de vapor de aire-agua y el calor constante de vaporización.

- La pérdida de agua por evaporación es insignificante.
- La fuerza que impulsa la transferencia de calor es la diferencia de entalpía entre el aire saturado y el “bulk air”.
- Tanto las propiedades de la gota de agua, el aire y los coeficientes de transferencia de masa y calor permanecen constantes.
- En cuanto al movimiento de la gota, se considera como un cuerpo esférico.
- Se asume que la temperatura de la superficie exterior de la gota es la misma que la de su interior.
- El factor de Lewis es igual a 1 y relaciona la transferencia de calor y masa.
- El movimiento de la gota dentro de la torre de enfriamiento es totalmente vertical.

Algunas de estas consideraciones se han adaptado con respecto al método de Merkel, Poppe y  $\varepsilon$ -NTU para resolver modelos numéricos considerando las pérdidas de agua debido a la evaporación en la ecuación de la energía (Kloppers & Kröger, 2005). Por otro lado, las consideraciones empleadas en la solución de modelos de CFD reducen los requisitos de cómputo en las simulaciones, además de incrementar la precisión de los resultados (Nasrabadi & Finn, 2014). La Tabla 3 muestra algunos factores que sirvieron a las investigaciones dar solución a estudios numéricos o simulaciones CFD.

**Tabla 3.** Resumen de las suposiciones encontradas en algunas investigaciones.

Autor	Características y consideraciones del modelo matemático
Kloppers (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El factor de Lewis se asume como 1. Aunque este supuesto tiene una influencia mínima, puede afectar los resultados en temperaturas ambientales bajas</li> <li>• Asume que el aire que sale de la torre está saturado con vapor de agua y se describe solo por su entalpía. Esta suposición de saturación tiene un impacto menor a temperaturas superiores a 20 °C, pero se vuelve significativa a temperaturas más bajas</li> <li>• La reducción del caudal de agua debido a la evaporación se omite en el balance energético. Esta simplificación del equilibrio de energía tiene un impacto mayor en temperaturas ambientales elevadas</li> </ul>
Naphon, 2005	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asume que la distribución de temperatura del flujo de agua en cualquier sección transversal es uniforme</li> <li>• No considera transferencia de calor y masa entre el sistema y el entorno</li> <li>• Supone que el número de Lewis es constante dentro de la torre</li> <li>• Los calores específicos del agua y del aire seco se mantienen constantes dentro de la torre</li> <li>• Los coeficientes de transferencia de calor y masa se consideran constantes dentro de la torre</li> </ul>
Qi, Liu y Li (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los coeficientes de transferencia de calor y masa se mantienen constantes dentro de la torre; el aire frío y el agua caliente se consideran con propiedades físicas constantes</li> <li>• La presión de vapor en la torre es tan baja que tiene una influencia mínima en la presión en toda la torre. Por lo tanto, se utiliza el valor promedio de la presión atmosférica en los cálculos</li> <li>• Las gotas de agua que se desplazan dentro de la torre se consideran como esferas</li> <li>• Supone que la temperatura tanto en el exterior como en el interior de la gota es uniforme, lo que significa que la resistencia térmica a la caída de agua es insignificante</li> <li>• Considera que el factor de Lewis es igual a 1</li> <li>• Asume que la gota de agua se mueve verticalmente en una dimensión</li> <li>• Los coeficientes de transferencia de calor y masa en toda la torre se consideran constantes</li> </ul>

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es el campo de estudio dedicado a solucionar ecuaciones del flujo de fluidos con computadora y ha demostrado ser una herramienta efectiva para comprender los mecanismos de transferencia de calor y masa en las torres de enfriamiento, así como para determinar las pérdidas por evaporación y arrastre (Versteeg, 2007). Las técnicas para la solución de los modelos matemáticos computacionales son de gran importancia, ya que la modificación en la geometría, malla o condiciones de frontera son fundamentales para la obtención de resultados precisos con un porcentaje de error mínimo (Fluent ANSYS, 2013). Es conveniente tener en cuenta clarificar el propósito de la simulación, ya sea para analizar el flujo de agua, la transferencia de calor o la evaporación de gotas. La creación de la geometría CAD en un *software* CFD debe incluir las secciones de interés de la torre de enfriamiento y definir el dominio de la simulación. Una ventaja notable de la geometría de las torres de enfriamiento es su estructura axialmente simétrica, lo cual ha permitido a los investigadores utilizar solo la mitad o incluso una cuarta parte de la torre para reducir tanto el tiempo de solución como los requerimientos de *hardware* (Fluent ANSYS, 2017).

Posteriormente seleccionar el tipo de malla adecuado (estructurada y no estructurada), aplicar un refinamiento en las zonas críticas donde se espera un mayor gradiente de variables evitando elementos distorsionados que puedan afectar la precisión de la simulación. La selección del solucionador involucra conocer la física del problema, seleccionar el método numérico y configuraciones del solucionador, como el esquema de discretización y la tolerancia de convergencia. Además, se deben definir las condiciones de frontera del modelo los parámetros de operación, que incluyan las propiedades de los materiales, flujos de aire

y agua. En el estudio de gotas es recomendable el uso de modelos de fase discreta (DPM), volumen de fluido (VOF), mezcla o Euleriano-Euleriano (Lopes & Quinta-Ferreira, 2010); hay que activar modelos físicos de turbulencia según la naturaleza del flujo en la torre de enfriamiento. Finalmente, el posprocesamiento, visualizar campos de velocidad, temperatura y presión en todo el dominio computacional; es posible realizar un mapeo de gotas de agua, o los flujos de agua y aire a la entrada o salida.

En la modelación de la caída de una gota de agua con aire en contraflujo, el desplazamiento de cada gota dentro del aire está condicionado por la forma en que interactúa; esta interacción se ve afectada por la transferencia simultánea de calor, masa y momento entre la gota y el aire a su alrededor. La presencia de gotas en el flujo de aire puede ser considerada al incluir términos de fuente de masa, energía y momento en las ecuaciones que rigen la fase del aire. Estos términos de fuente se calculan a partir del enfoque Lagrangiano con un método alternativo basado en el método de volumen finito.

Rotar, Širok, Drobnič, Novak y Donevski (2005) realizaron un estudio tanto numérico como experimental para investigar las características aerotermodinámicas del flujo de aire en una torre de enfriamiento de tiro natural, con una capacidad de 350 MW. Al combinar análisis experimentales y numéricos pudieron determinar los campos de temperatura y velocidad dentro de la torre, lo que les permitió detectar y abordar algunas irregularidades en el flujo de aire mediante la reconstrucción de ciertos componentes.

En cuanto a torres de enfriamiento húmedas, Jiang, Liu y Jiang (2013) llevaron a cabo un estudio numérico y lo validaron de forma experimental. Obtuvieron correlaciones empíricas para los coeficientes de

transferencia de calor y masa. Realizaron pruebas experimentales variando parámetros característicos en la entrada de la torre, como la temperatura del agua y aire, y los flujos de masa, entre otros. Por otro lado, Wan, Ren y Xing (2017) utilizaron un modelo CFD para simular los procesos de enfriamiento evaporativo y calcularon las fracciones en masa de vapor de agua en la interfaz gas-líquido. Blain, Belaud y Miolane (2016) desarrollaron un modelo en CFD basándose en las ecuaciones de Poppe y Merkel; validaron sus resultados mediante valores a escala real por alrededor de seis meses por medio de sensores.

Para evaluar la transferencia de calor y masa, Al-Waked y Behnia (2006) presentaron un modelo CFD de una torre de enfriamiento de tiro natural, y estudiaron el efecto de los parámetros operativos y del flujo cruzado de aire en el desempeño térmico. El modelo se validó bajo las condiciones de diseño y mostró que cumplió satisfactoriamente su solución, y que la diferencia entre los resultados entre el modelo CFD y de la curva de diseño fue inferior al 3 %. Por otro lado, Klimanek, Cedzich y Bialecki (2015) estudiaron el efecto del flujo cruzado de aire y que la inyección de aire tiene un efecto positivo, pero insignificante sobre la temperatura del agua enfriada debido a un ligero aumento del caudal de aire a través de la torre. Velandia, Chery y Lopez (2016) estudiaron la dinámica del flujo de aire con dos configuraciones distintas: una con sección transversal cuadrada y otra circular; para ambas configuraciones se desarrollaron modelos en CFD y se evaluaron experimentalmente mediante un túnel de viento; caracterizaron el comportamiento de la simulación para relacionar la caída de presión del aire que pasa a través de la torre de enfriamiento.

En cuanto a estudios CFD donde utilizaron modelos 3D, Zhao *et al.* (2016) evaluaron, a través de su modelo en CFD, los parámetros

operativos en condiciones sin aire y con aire a flujo cruzado; establecieron criterios de convergencia y la independencia en la malla en los resultados numéricos. Montazeri, Blocken y Hensen (2015) realizaron una simulación CFD y validaron de manera experimental el enfriamiento evaporativo mediante sistemas de aspersión; también realizaron un análisis de sensibilidad enfocado en la malla en el modelo de turbulencia y en el ángulo del cono del difusor.

Los estudios CFD ayudan asimismo a evaluar las pérdidas por evaporación y arrastre. Meroney (2006) evaluó el aumento de la deposición de gotas de agua alrededor de una torre de enfriamiento y simuló trayectorias de partículas para diámetros que van de 2 a 0.001 mm. En cuanto a las investigaciones que implican análisis de CFD, es recomendable seguir una metodología para llevar a cabo un modelado analítico de evaporación de gotas de agua, con independencia del tipo de solución que el *software* utilice, ya sea por el método de volumen finito (MVF), el método de elemento finito (MEF) o el método de diferencias finitas (MDF), entre otros (Fluent ANSYS, 2013). El modelado analítico en torres de enfriamiento para el estudio de fenómenos evaporativos en gotas de agua con *software* CFD debe contar con lo siguiente (Tu, Yeoh, Liu, & Tao, 2023):

- Planteamiento del fenómeno a analizar: que consiste en un modelo de flujo bifásico donde la gota de agua representa la fase dispersa y el aire a contraflujo la fase continua.
- Seleccionar el marco de referencia de estudio que puede seguir la trayectoria de la gota o la formación, deformación y desprendimiento de masa de la gota.

- Para el planteamiento inicial se debe identificar el modelo matemático con el cual trabaja el *software* (MVF, o MEF) y la manera de discretizar las ecuaciones de Navier-Stokes.

A partir de este punto, la metodología a seguir consta de tres componentes esenciales (Zawawi *et al.* 2018):

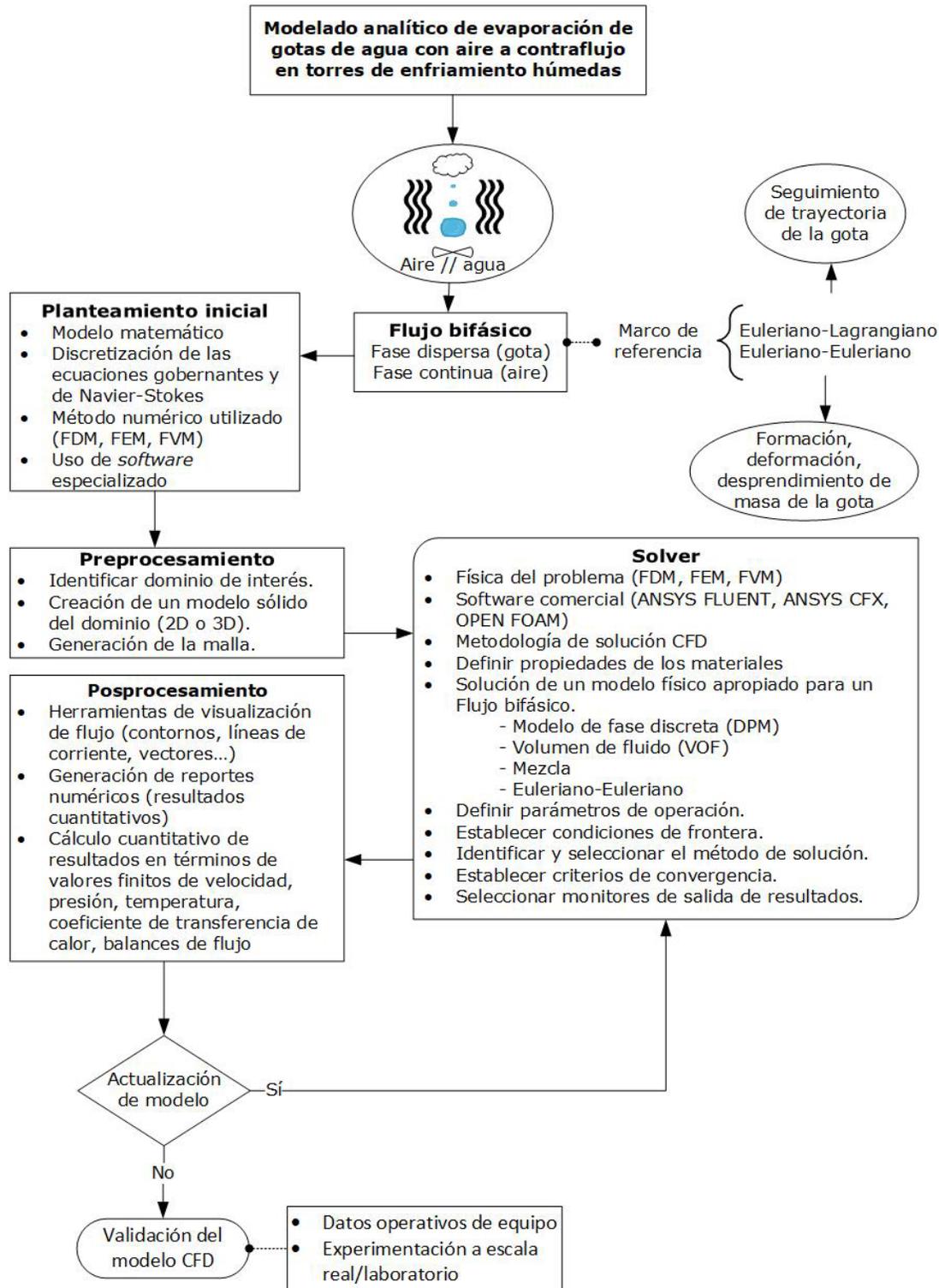
- Preprocesamiento: se identifica el dominio de interés a estudiar; el modelo sólido puede establecerse en 2D o 3D, y se genera la malla computacional.

- Solucionador: se establece la física de la gota, se definen las propiedades de los materiales y del fluido, también se establece el modelo de fase discreta (DPM) o el volumen de fluido (VOF) para la solución del modelo de flujo bifásico. Se definen los parámetros de operación, como temperatura inicial de la gota, velocidad del aire, humedad. Luego se establecen las condiciones de frontera en el dominio computacional (entradas, salidas, paredes, etc.). Se identifica y selecciona el método de solución en función del marco de referencia (Euleriano-Euleriano o Euleriano-Lagrangiano). Por último, se seleccionan los criterios de convergencia y se seleccionan los monitores de salida de resultados.

- Posprocesamiento: en esta etapa se utilizan las herramientas de visualización de flujo: contornos de velocidad, presión, temperatura; se generan reportes numéricos con los resultados cuantitativos en términos de valores finitos de las variables de interés evaluadas. Por último, el análisis de los resultados lleva a dos opciones: actualizar el modelo computacional con otros parámetros operativos o, de lo contrario, realizar la validación del modelo CFD por medios experimentales.

En la Figura 7 se muestra un diagrama de flujo y los requisitos generalizados para realizar un estudio CFD. No obstante, es

recomendable importante considerar que la fiabilidad de los modelos CFD dependen de su validación experimental y que las capacidades de un modelado CFD está limitada por la capacidad computacional.



**Figura 7.** Diagrama de flujo del modelado analítico y requisitos genéricos para realizar un estudio CFD en evaporación de gotas.

Los modelos CFD pueden resultar de gran utilidad, ya que es posible establecer dominios computacionales que abarquen todos los parámetros dimensionales y operativos de la torre de enfriamiento húmeda. La Tabla 4 muestra las características particulares del modelo matemático computacional en torres de enfriamiento.

**Tabla 4.** Características particulares del modelo matemático computacional.

Autor	Características particulares del modelo matemático computacional
Lucas <i>et al.</i> (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dominio (<i>enclosure</i>): 3 000 x 1 000 x 750 m</li> <li>• Modelo físico de torre de enfriamiento</li> <li>• <math>D_{base} = 114 \text{ m}</math>; <math>D_{salida} = 54.8 \text{ m}</math>; <math>H = 124 \text{ m}</math></li> </ul>
Jiang <i>et al.</i> (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los procesos de transferencia de calor y masa están en estado estacionario</li> <li>• El intercambio de calor y masa entre la torre de enfriamiento y los alrededores es insignificante</li> <li>• Se supone que el calor específico de los fluidos es constante</li> <li>• La película de agua pulverizada cubre de manera uniforme toda la pared de los tubos y las aletas, de modo que el intercambio de calor entre el aire y agua de proceso es insignificante</li> <li>• El flujo del agua del proceso y el aire es aproximadamente contracorriente</li> </ul>
Al-Waked y Behnia (2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de la aproximación Euleriana-Lagrangiana</li> <li>• Dominio (<i>enclosure</i>) → radio y altura → 500 m</li> <li>• Modelo físico de torre de enfriamiento:</li> <li>• <math>D_{base} = 95.2 \text{ m}</math> // <math>H = 129.8 \text{ m}</math> // <math>H_{interior} = 8.6 \text{ m}</math></li> </ul>
Klimanek <i>et al.</i> (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizaron elementos tetraédricos y hexaédricos en la malla</li> <li>• Dominio (<i>enclosure</i>) → diámetro = 200 m y altura = 300 m</li> <li>• Modelo físico de torre de enfriamiento:</li> <li>• <math>D_{base} = 95 \text{ m}</math> // <math>D_{salida} = 54.74 \text{ m}</math> // <math>H = 129.8 \text{ m}</math> //</li> <li>• Gases de combustión → <math>D_{tubo} = 7 \text{ m}</math> // <math>H_{base} = 25.86 \text{ m}</math></li> </ul>

Autor	Características particulares del modelo matemático computacional
Tissot, Boulet, Trinquet, Fournaison y MacChi-Tejeda (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudio numérico para determinar las condiciones de enfriamiento de aire mediante la evaporación de gotas en condensadores (torres de enfriamiento evaporativas). Acoplamiento entre la fase continua y dispersa</li> <li>Modelo físico de túnel de viento:</li> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 0.38 \times 0.26 \text{ m}^2</math>; <math>l = 1.70 \text{ m}</math></li> <li><math>\dot{V} = 0.025 \text{ l/min}</math> // <math>d_{\text{gota}} = 25 \sim 50 \text{ }\mu\text{m}</math> // aspersor cónico a <math>72^\circ</math> // <math>T_{\text{gota}} = 298 \text{ K}</math> // <math>v_{\text{gota}} = 10 \text{ m/s}</math></li> <li>Aire <math>\rightarrow T_{\text{aire}} = 298 \text{ K}</math>; <math>HR = 30 \%</math>; <math>v_{\text{gota}} = 1 \text{ m/s}</math></li> </ul>

Otro aspecto importante en el estudio de las torres de enfriamiento es determinar la cantidad de agua que se pierde bajo diferentes condiciones operativas. Además, los estudios sobre las gotas de agua se concentran en las zonas de aspersion y lluvia, y se utilizan herramientas para medir los cambios en el diámetro de las gotas.

El proceso de evaporación de gotas en una corriente de aire a contraflujo ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas debido a su presencia en una vasta gama de aplicaciones. Durante este fenómeno, el tamaño de las gotas disminuye de forma continua, lo que requiere abordar el problema en condiciones no estacionarias. El diámetro de la gota es un parámetro significativo que determina la influencia de ciertos factores, como la tensión superficial, la fuerza gravitacional y el camino libre medio de las moléculas de vapor en el proceso de evaporación. Por lo tanto, es necesario seleccionar un modelo físico adecuado para la evaporación de gotas que tome en consideración los factores más relevantes (Borodulin, Letushko, Nizovtsev, & Sterlyagov, 2016).

Cabe resaltar que la energía requerida para evaporar el agua es mucho mayor que la necesaria para enfriar la misma cantidad de agua en 1 °C. Una sola gota de agua en un entorno no saturado experimenta procesos de transferencia de calor, masa y momento, como sigue:

- El gradiente de temperatura en la interfaz gota-aire provoca una transferencia neta de calor del aire a la superficie de la gota si el aire es más caliente que la gota.
- La concentración de vapor de agua cerca de la superficie del agua da lugar a la difusión del agua desde la superficie de la gota al aire no saturado. Debido a la energía latente de este cambio de fase, dicha transferencia de masa está fuertemente acoplada con la transferencia de calor.
- Si hay un movimiento relativo entre la gota de agua y el aire circundante, se producirá una transferencia de impulso entre ellos. Esta transferencia de impulso tiende a aumentar la velocidad tanto del calor como de la transferencia de masa.
- No se produce aglomeración, colisión o coalescencia de gotas de agua.
- El flujo de masa de agua que pasa a través de la zona de relleno se distribuye de modo uniforme y todos los diámetros de las gotitas son iguales (en la práctica se debe usar un diámetro efectivo de las gotas) (González-Pedraza *et al.*, 2018).
- Las gotas ingresan a la zona de lluvia con velocidad absoluta cero (las pruebas numéricas muestran que las velocidades de entrada de gotitas variables tienen una influencia relativamente pequeña en el rendimiento general si las gotas ingresan a la zona de lluvia por debajo del 10 % de la velocidad terminal).

- Las gotas que caen no tienen efecto en la distribución de la velocidad del aire ni en la solución de flujo potencial al flujo de aire.
- No hay interacción mutua entre las gotas con respecto a la transferencia de masa y la resistencia viscosa.
- Las propiedades físicas tanto de las gotitas como del aire cambian de manera insignificante al atravesar la zona de lluvia.

Las investigaciones experimentales y numéricas expuestas en este documento destacan varias relaciones entre las propiedades de la gota, como su trayectoria, velocidad inicial, temperaturas iniciales del agua y del aire, y el diámetro de la gota, entre otros aspectos. Cerqueira, Paladino y Maliska (2015) llevaron a cabo un análisis numérico de partículas fluidas tanto esféricas como deformadas en un flujo laminar ( $Re = 80.0$ ). Encontraron que, a medida que las partículas se deformaban, el coeficiente de transferencia disminuía, aunque el aumento del área compensaba este efecto sobre la transferencia de calor.

Terblanche, Reuter y Kröger (2009) realizaron un estudio experimental enfocado en analizar la distribución de los tamaños de gota presentes en la zona de lluvia de torres de enfriamiento. Para llevar a cabo su investigación, emplearon técnicas fotográficas y evaluaron tres tipos diferentes de relleno dentro de las torres. Durante los experimentos variaron las condiciones de entrada tanto del agua como del aire con el objetivo de cuantificar los cambios en el diámetro de las gotas. Los autores recurrieron a la correlación empírica conocida como Rosin-Rammler, la cual es ampliamente utilizada para caracterizar distribuciones de tamaño de partículas.

Duguid (1969) llevó a cabo una investigación sobre los rangos de evaporación de pequeñas gotas de agua, con diámetros entre 3 y 9  $\mu\text{m}$

en caída libre dentro de una corriente de aire a contraflujo en un tubo vertical. Realizó experimentos para comparar los resultados obtenidos de manera experimental con los modelos teóricos, y logró determinar la posición de las gotas a partir del análisis de imágenes, lo que le permitió observar y cuantificar los cambios que estas experimentaban a lo largo del tiempo.

Sartor y Abbott (1975) estudiaron el movimiento acelerado de gotas de agua con un número de Reynolds entre 0.01 y 5, y realizaron experimentos para comparar los resultados obtenidos. Obtuvieron expresiones analíticas para la velocidad y distancia de caída en función del tiempo mientras las gotas aceleraban. Concluyeron que, dentro de ese rango de Reynolds, las fuerzas de arrastre pueden utilizarse en soluciones numéricas y analíticas para las ecuaciones de movimiento de gotas aceleradas.

En el estudio numérico realizado por Lorenzini y Saro (2013) se evaluó la dinámica de gotas de agua durante su proceso de evaporación en aire. Su modelo numérico contempló todos los fenómenos transitorios involucrados en la dinámica del fluido térmico, como calentamiento, enfriamiento, evaporación y condensación, así como los efectos dinámicos de fricción y flotabilidad.

Givoni (1997) llevó a cabo un estudio experimental centrado en analizar el proceso de evaporación que ocurre en gotas de agua al entrar en contacto con una corriente de aire. En su investigación comparó el comportamiento y rendimiento de dicho fenómeno bajo diferentes condiciones climáticas. Los hallazgos revelaron que el desempeño de la evaporación se ve influenciado por diversos elementos de diseño, tales como la altura de la zona de aspersión, el caudal de agua utilizado, el sistema de aspersión empleado o el tamaño de las gotas involucradas.

Pearlmutter, Erell, Etzion, Meir y Di (1996) desarrollaron un prototipo de torre de enfriamiento por evaporación a pequeña escala. En su estudio variaron los parámetros operativos tanto para el aire como para el agua y lograron una reducción de temperatura de 10 °C en condiciones de verano. A pesar de la expectativa de que el proceso de evaporación sería más eficiente debido al uso de pequeñas gotas de agua dispersas en un área de superficie relativamente mayor, no encontraron evidencia que respaldara esta relación en la torre real. Los autores concluyeron que determinar una relación precisa entre el diámetro de la gota y la eficiencia de enfriamiento sigue siendo un tema abierto a investigación.

Fisenko, Petrushik y Solodukhin (2002) observaron cierta dependencia en el tamaño de la gota con respecto al flujo de agua. Pudieron determinar el valor de un radio de gota efectivo en función de la carga hidráulica con valor a 1 mm. El modelo matemático permite predecir parámetros operativos en las distintas zonas de la torre de enfriamiento.

Gilani y Parpanji (2018) realizaron un estudio numérico con el objetivo de mejorar la precisión de los modelos matemáticos utilizados para predecir el rendimiento de las torres de enfriamiento. Además, los investigadores consideraron el proceso de evaporación de las gotas de agua al incorporar una ecuación que describe la variación del diámetro de las mismas a medida que atraviesan la torre. Finalmente, un estudio paramétrico mostró que el aumento en la altura (de 6 a 8 m) de las torres conduce a la disminución de la temperatura del agua de salida.

En las investigaciones de Ivchenko (1979), Ivchenko (1984), e Ivchenko y Muradyan (1982) se estudiaron los fenómenos de evaporación de gotas esféricas bajo condiciones controladas de laboratorio. Logró

derivar una fórmula analítica que permite determinar la reducción del diámetro de las gotas en función del tiempo transcurrido, aplicable a diferentes regímenes o etapas temporales del proceso evaporativo.

Chini y Amirfazli (2013) realizaron un estudio enfocado en comprender el proceso de evaporación de gotas esféricas en un ambiente estático o inactivo. En su trabajo desarrollaron un modelo transitorio y convectivo basado en los principios de transferencia de calor, para explicar el fenómeno evaporativo en gotas. Este modelo involucra la evaluación de las consideraciones planteadas por Maxwell con el fin de determinar la tasa de evaporación de las gotas de manera precisa.

Respecto a la caída libre de gotas, Guella, Alexandrova y Saboni (2008) investigaron la influencia que tiene el fenómeno de evaporación sobre la velocidad instantánea de gotas con diámetros inferiores a un milímetro durante su descenso. Los autores realizaron experimentos utilizando un modelo de columna vertical, los cuales les permitieron validar su modelo matemático propuesto. Este modelo predictivo se basó en la solución de la ecuación que gobierna el movimiento de la gota y considera los efectos del cambio de fase por evaporación.

Collin *et al.* (2007) llevaron a cabo una simulación numérica para estudiar el comportamiento de gotas de agua pulverizadas y el impacto de la atenuación de la radiación en relación con la dinámica de estas gotas. Los pasos clave de la simulación fueron los siguientes: rastrear las gotas inyectadas en aire húmedo, considerando las condiciones de inyección, gravedad, arrastre, vaporización y dispersión turbulenta; describir el flujo de aire inducido principalmente por los efectos de arrastre; observar el fenómeno de la propagación de la radiación a través de este medio debido a las correspondientes propiedades de absorción y

dispersión. Para la solución de la dinámica de gotas proponen los siguientes pasos (Collin *et al.*, 2007):

1. Primer seguimiento de las gotas en el aire en reposo; descartar la evaporación, transferencia de calor y dispersión turbulenta en el cálculo de la trayectoria para minimizar el tiempo computacional de esta etapa temprana del cálculo; registrar cada paso y calcular su contribución a los diversos términos fuente dirigidos a modelar la influencia de la fase dispersa en la continua.

2. Solución de la simulación Euleriana para el flujo de aire en condiciones isotérmicas, teniendo en cuenta los resultados del paso anterior para la fase dispersa que inducirá el flujo de aire debido a los efectos de arrastre.

3. Seguimiento de las gotas en el campo de flujo correspondiente sin considerar la transferencia de calor y vaporización, evaluando los términos fuente ajustados que se incorporarán en el siguiente paso de la solución Euleriana.

4. Solución para la simulación Euleriana de la fase fluida en condiciones isotérmicas teniendo en cuenta las estadísticas corregidas producidas por el paso anterior, realizando 200 iteraciones.

5. Repetición de los pasos (3) y (4) hasta que la convergencia se considere suficiente; el número de iteraciones garantiza que los llamados efectos de acoplamiento bidireccional se han tenido en cuenta de forma correcta.

6. Repetición de los pasos (3) y (4); activación de los efectos de vaporización y transferencia de calor hasta alcanzar la convergencia completa.

Nuyttens, Baetens, De Schampheleire y Sonck (2007) desarrollaron un equipo de prueba y un protocolo para caracterizar boquillas de pulverización mediante la medición de tamaños y velocidades de gotas, utilizando principios de dispersión de luz. Es importante destacar que el rango de tamaño de las gotas medidas oscilaba entre 80 y 700 micras.

Continuando con el trabajo de Kachhwaha *et al.* (1998), Sureshkumar, Dhar y Kale (2007) llevaron a cabo un análisis sobre el efecto del modelado de aspersores. Para ello, desarrollaron un modelo de transferencia de masa y calor que describe la interacción entre el aire y el agua en diferentes condiciones, como el diámetro de la gota, la velocidad del aire, la temperatura del bulbo seco y la humedad específica. Los tamaños de las gotas utilizados variaron entre 3 y 5.5 milímetros.

Muangnoi, Asvapoositkul y Hungspreugs (2014) realizaron un análisis de sensibilidad para evaluar la variación de cada parámetro de diseño que afecta la evaporación de gotas de agua. Estos parámetros incluyen la altura del sistema de pulverización, la relación de flujo másico de agua-aire, el diámetro inicial de la gota, la temperatura del agua de entrada, la temperatura de bulbo seco, la velocidad inicial de pulverización y la velocidad del aire, y cómo influyen en el rendimiento del sistema.

Cui, Li, Peng, Cheng y Li (2016) desarrollaron un modelo matemático de gotas utilizadas en una torre de enfriamiento para el estudio de la dinámica de gota y desempeño térmico; validaron su modelo con datos operativos en condiciones reales, y analizaron también las influencias de diferentes velocidades iniciales del aire y agua en la distribución de temperatura a diferentes alturas de la torre.

Kumar y Chandra (2015) desarrollaron un modelo y simulación numérica de la evaporación de una gota, que destaca la dinámica de burbujas y gotas, así como el efecto del cambio de fase en la dinámica de la caída de una gota para distintos valores utilizando el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$ .

Sirena (2013) propuso un indicador de calidad para evaluar la eficiencia en el consumo de energía del ventilador en una torre de enfriamiento de tiro mecánico; resalta su relevancia al momento de seleccionar o ajustar los componentes internos. Además, en concordancia con otros estudios previos, los autores coincidieron en que la eficiencia de la torre de enfriamiento aumenta a medida que se incrementa la relación entre los flujos máscicos de agua y aire (l/g). La Tabla 5 muestra de forma resumida las características particulares para modelar los fenómenos evaporativos en gotas de agua.

**Tabla 5.** Características particulares para modelar los fenómenos evaporativos en gotas de agua.

Autor	Suposiciones clave
Lorenzini y Saro (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema físico considerado es una sola gota que sale de la boquilla de un rociador y se genera exactamente en correspondencia con la salida de la boquilla</li> <li>• Las fuerzas aplicadas al sistema son peso, flotabilidad y fricción</li> <li>• La gota tiene un cuerpo completamente esférico en su recorrido</li> <li>• El volumen de la gota es variable en la caída debido a su evaporación continua</li> <li>• El viento se considera como una entidad vectorial, lo que puede afectar el vuelo de las gotas en todas las direcciones o sentidos posibles</li> <li>• Se deben realizar estudios paramétricos en la humedad del aire y la radiación (solar/ambiental) para ver cambios potenciales en los resultados</li> <li>• La difusión de la fase continua en el agua es despreciable</li> </ul>
Pearlmutter <i>et al.</i> (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El gradiente de temperatura entre las fases continua y dispersa provoca una transferencia neta de calor del aire a la superficie de la gota si el aire es más caliente que la gota</li> <li>• La concentración de vapor de agua cerca de la superficie de la gota da paso a la difusión del agua desde la superficie de la gota al aire no saturado. Esta difusión de agua necesita una evaporación previa de la gota. Debido a la energía latente de este cambio de fase, esta transferencia de masa está fuertemente acoplada a la transferencia de calor</li> <li>• Si hay un movimiento relativo entre la gota y el aire circundante, se producirá una transferencia de impulso entre ellos. Esta transferencia de impulso tiende a aumentar la tasa de transferencia de calor y de masa</li> </ul>
Gilani y Parpanji (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las gotas de agua viajan en dirección vertical desde la salida del aspersor hasta el depósito</li> <li>• Las gotas son esferas y su forma (no su tamaño) no cambia durante el movimiento</li> <li>• El movimiento de la gota alcanza una velocidad constante desde la salida del aspersor</li> <li>• El movimiento de la gota después de que alcanza una velocidad es constante y continúa viajando con esta velocidad</li> </ul>

Autor	Suposiciones clave
Collin <i>et al.</i> (2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguimiento de las gotas inyectadas en aire húmedo tomando en cuenta las condiciones de inyección, gravedad, arrastre, vaporización y dispersión turbulenta</li> <li>• Descripción del aire inducido por efectos de arrastre</li> <li>• Propagación de radiación a través de este medio debido a las propiedades de absorción y dispersión</li> <li>• La ruptura hidrodinámica de las gotas, posibles colisiones y efectos de coalescencia no se incluyen en el seguimiento Lagrangiano</li> </ul>
Cui <i>et al.</i> (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las interacciones entre las gotas son insignificantes, y las gotas ascendentes no chocan con las gotas que caen</li> <li>• Las condiciones de la gota y aire son uniformes, solo cambian con la dirección vertical</li> <li>• El aire y la solución tienen propiedades físicas constantes</li> <li>• No se produce transferencia de calor y masa en la pared del dispositivo</li> <li>• La concentración de la solución es constante (en este estudio se optó por una solución de cloruro de calcio con una fracción de masa del 16 %), ya que el vapor de agua contenido en el aire es insignificante en comparación con el flujo de masa de la solución; el diámetro de la gota no cambia debido a la misma razón</li> <li>• La resistencia térmica dentro de las gotas es insignificante en comparación con el lado del aire</li> </ul>

Para evaluar los modelos numéricos y contrastar los resultados obtenidos en las investigaciones sobre torres de enfriamiento se pueden emplear dos métodos principales (Montazeri *et al.*, 2015):

- Mediciones a gran escala: se llevan a cabo en la torre real, lo que permite estudiar la situación *in situ* y considerar toda la complejidad del problema. Sin embargo, generalmente se limitan a zonas localizadas o a condiciones operativas específicas.

- Mediciones de túnel de viento a nivel de laboratorio: este método ofrece un alto grado de control sobre las condiciones operativas y permite realizar cambios de diseño tanto estructurales como de componentes internos. Esto lo convierte en una herramienta valiosa para profundizar en el estudio del comportamiento de las torres de enfriamiento. No obstante, los requisitos de similitud a veces son incompatibles y sus limitaciones dependen del tamaño del experimento y de los puntos de interés que se deseen analizar.

En comparación con las mediciones a escala real, las pruebas a escala de laboratorio suelen contar con un sistema de instrumentación más avanzado y un mayor control sobre las condiciones experimentales, lo que permite evitar la interferencia de la turbulencia ambiental. Los datos experimentales resultantes suelen ser más consistentes y estables. De acuerdo con Li, Gurgenci, Guan, Wang y Xia (2019), los resultados obtenidos en laboratorio no pueden aplicarse de forma directa para predecir el comportamiento de torres reales a menos que se cumplan las condiciones de similitud geométrica y dinámica entre ambas (como los números de Froude y Reynolds).

La metodología experimental se basa en el principio de funcionamiento de las torres de enfriamiento. El agua se distribuye de manera uniforme en la zona de aspersion, desde donde cae en dirección vertical a través del relleno. Las gotas de agua atraviesan el relleno y se acumulan en un depósito contenedor ubicado en la parte inferior de la torre. De forma simultánea se introduce aire a contracorriente mediante un ventilador centrífugo, cuya velocidad puede ser ajustada. El agua del depósito se recircula hacia los aspersores por medio de una bomba, pasando previamente por un calentador eléctrico para controlar su temperatura. Antes de iniciar el experimento, se instala el equipo de

monitoreo, que incluye sensores de temperatura y humedad, flujómetros, anemómetros y cámaras de alta velocidad. Se verifica el correcto funcionamiento de cada componente y, una vez que todo está listo, se procede a iniciar las pruebas.

Asvapoositkul y Treeutok (2012) desarrollaron un método de cálculo para determinar las características de operativas de una torre de enfriamiento y la masa de agua evaporada en términos de la relación de flujos agua-aire. Los resultados experimentales se pueden utilizar para optimizar el diseño de la torre de enfriamiento para un conjunto dado de condiciones de operación.

Širok, Iagojevič, Novak, Hočevár y Jere (2003) llevaron a cabo diagnósticos en torres de enfriamiento de tiro natural mediante mediciones experimentales y análisis de transferencia de calor y masa. Relacionaron la eficiencia de la torre de enfriamiento con las características geométricas de las gotas, así como con los flujos máxicos de aire y agua. Utilizaron un robot para mapear el flujo de aire saliente y determinar la ubicación exacta de los problemas de distribución de agua, que causan falta de homogeneidad en los perfiles de velocidad y temperatura. La Tabla 6 muestra las características particulares en investigaciones para validar de forma experimental estudios en torres de enfriamiento.

**Tabla 6.** Características particulares en investigaciones para validar de forma experimental estudios en torres de enfriamiento.

Autor	Dimensión y características de la experimentación
Naphon (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 0.15 \times 0.15 \text{ m}^2</math>; <math>H = 0.48 \text{ m}</math></li> <li>Incluye relleno: cobertura de área de <math>1.19 \text{ m}^2</math></li> </ul>
Pearlmutter <i>et al.</i> (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 1 \times 1 \text{ m}^2</math>; <math>H = 3 \text{ m}</math></li> </ul>
Lucas, Martínez y Viedma (2009), y Lucas <i>et al.</i> (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 0.70 \times 0.48 \text{ m}^2</math>; <math>H = 2.597 \text{ m}</math></li> <li>Incluye relleno de fibra de vidrio: <math>H = 1.13 \text{ m}</math></li> <li>Evaluaron distintos tipos de empaquetadura para el eliminador de bruma</li> </ul>
Tissot <i>et al.</i> (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 0.38 \times 0.26 \text{ m}^2</math>; <math>L = 1.70 \text{ m}</math></li> </ul>
Asvapoositkul y Treeutok (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 1 \times 1 \text{ m}^2</math>; <math>H = 3.35 \text{ m}</math></li> <li>Incluye relleno: <math>H = 1.50 \text{ m}</math></li> <li>Zona de lluvia: <math>H = 0.40 \text{ m}</math></li> </ul>
Montazeri <i>et al.</i> (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudio numérico experimental en túnel de viento</li> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 0.585 \times 0.585 \text{ m}^2</math>; <math>L = 1.90 \text{ m}</math></li> </ul>
Muangnoi <i>et al.</i> (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 1.0 \times 1.0 \text{ m}^2</math>; <math>H = 3.35 \text{ m}</math></li> <li>Altura del aspersor: <math>1.7 \sim 2.5 \text{ m}</math></li> </ul>
Cui <i>et al.</i> (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones <math>\rightarrow ST = 0.60 \times 0.60 \text{ m}^2</math>; <math>H = 1.71 \text{ m}</math></li> <li>Altura del aspersor: <math>1.7 \sim 2.5 \text{ m}</math></li> </ul>

De los montajes experimentales revisados, se pueden observar similitudes entre los casos estudiados aplicados al análisis de gotas de agua. Dichas características son las siguientes:

- La geometría de la torre de enfriamiento presenta dos configuraciones: una forma tubular vertical o una con una base de sección

cuadrada (que en configuración horizontal se asemeja a un túnel de viento).

- Dentro de los equipos que integran la experimentación se encuentran: un sistema de bombeo (que incluye la bomba de circulación, calentador eléctrico, sistema de tubería y accesorios); un equipo de monitoreo de propiedades (sensores de temperatura y humedad, flujómetro, anemómetros, cámara de alta velocidad, etc.), y un ventilador con variador de velocidad.
- El diseño del experimento puede o no contener relleno para su análisis.
- La altura de la torre se mide desde el nacimiento y concepción de la gota hasta donde cae la misma, que en general oscila desde 0.6~1.20 m. Por otro lado, la altura total de los experimentos a escala laboratorio ronda entre 2~2.5 m.
- El diseño del experimento, el método utilizado o el análisis de incertidumbre no forman parte de las investigaciones consultadas (Tabla 6). La validación de los modelos numéricos se compara con los resultados obtenidos mediante experimentación.

## Discusión

En este trabajo se realizó una revisión exhaustiva de las metodologías y estudios existentes orientados al consumo de agua debido a las pérdidas por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento a contraflujo. Se puntualizaron las partes esenciales de las torres de enfriamiento, los principios termodinámicos, el efecto de la humedad relativa, además de los modelos matemáticos empleados en el cálculo de los fenómenos de

transferencia de calor y masa, el uso de herramientas CFD, las técnicas experimentales para la validación de resultados, y las aplicaciones relacionadas con el estudio de fenómenos asociadas con la evaporación de gotas de agua.

Al analizar los diferentes enfoques presentados es posible identificar diversas estrategias que se ajusten a las necesidades específicas de cada componente interno de la torre de enfriamiento húmeda, contemplados en la Tabla 1 (Li *et al.*, 2018; Kachhwaha *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2017; Tomás *et al.*, 2018; Lemouari *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2019; Ramkrishnan & Arumugam, 2013; Goshayshi & Missenden, 2000); por lo tanto, la revisión y el análisis de varias metodologías pueden servir de guía al investigador hacia los campos generales de interés en el estudio de torres de enfriamiento.

Respecto a los enfoques que se pueden desarrollar en estudios de torres de enfriamiento, se puede establecer lo siguiente:

- Enfoque por zona: desarrollan mejoras por componente de la torre de enfriamiento húmeda, como los mostrados en la Tabla 1.
- Enfoque por método de investigación: desarrollan modelos matemáticos para predecir el funcionamiento operacional de la torre de enfriamiento; dan solución analítica y numérica por medio de CFD (Rotar *et al.*, 2005; Jiang *et al.*, 2013; Wan *et al.*, 2017; Blain *et al.*, 2016; Al-Waked & Behnia, 2006; Klimanek *et al.*, 2015; Velandia *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2016; Montazeri *et al.*, 2015). A través de este enfoque pueden evaluarse modelos en 2D y 3D, dependiendo del tamaño del dominio computacional, a distintas condiciones operacionales como las mostradas en la Tabla 4.

- Enfoque por método de investigación experimental: los aportes dados por medio de modelos matemáticos son validados, como al ajustar parámetros operacionales de la torre de enfriamiento húmeda. Los experimentos pueden ser a escala real o a escala laboratorio (Montazeri *et al.*, 2015). En la Tabla 6 se determinaron características particulares en los experimentos; sin embargo, las investigaciones consultadas no muestran a detalle el diseño del experimento o cálculo sobre la incertidumbre de la medición obtenida.

Con base en estas metodologías, los objetivos generales derivados de las investigaciones son los siguientes:

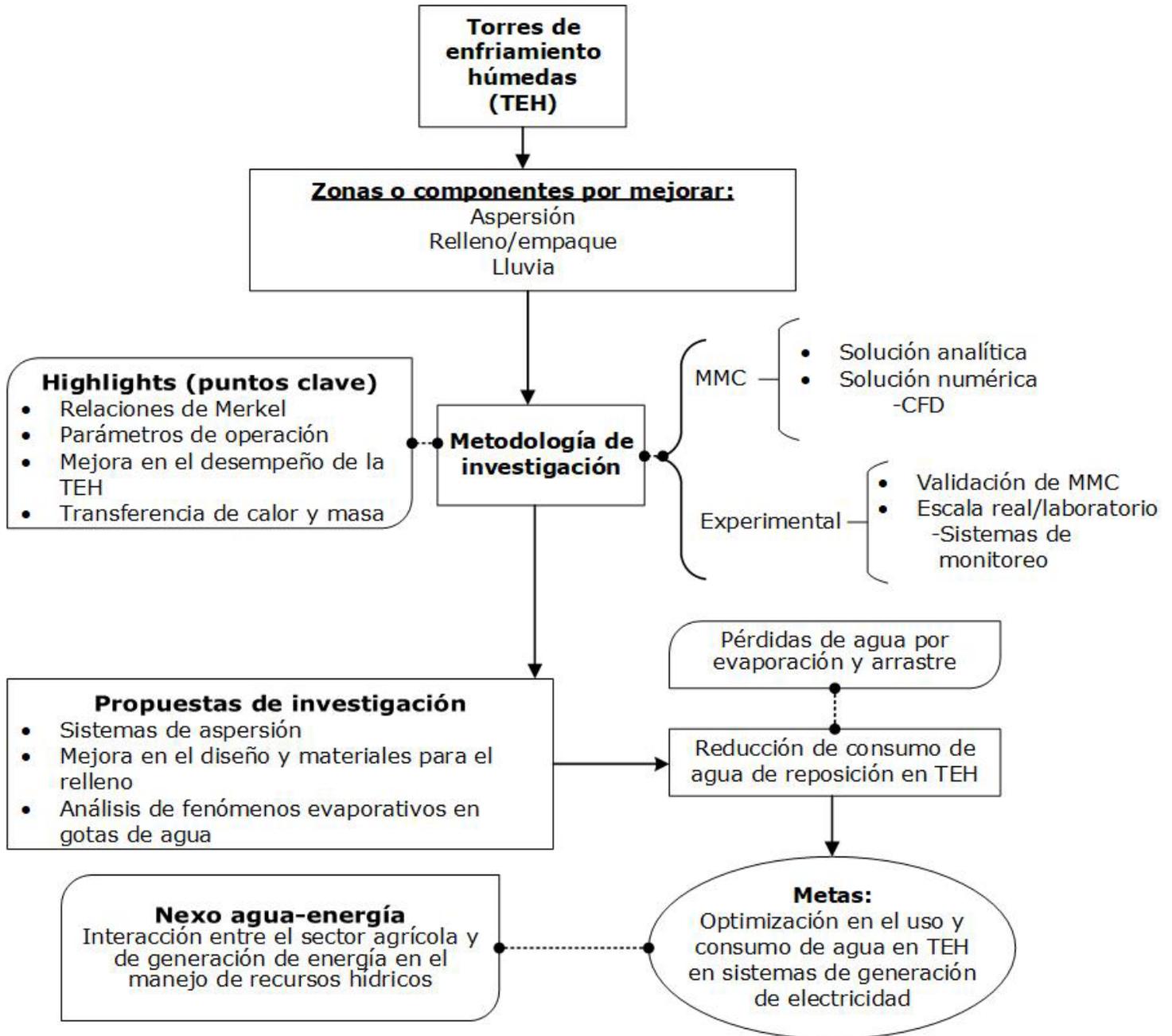
- Los estudios numéricos buscan mejorar las relaciones de Merkel, en función del método de Merkel, Poppe y  $\varepsilon$ -NTU para resolver modelos numéricos (Kloppers & Kröger, 2005; Rezaei, Shafiei, & Abdollahnezhad, 2010).
- Determinar los parámetros operativos a partir de un modelo matemático, que permitan un mejor desempeño de la torre de enfriamiento húmeda, comparando los resultados con datos experimentales (Naik & Muthukumar, 2017).
- Mejora de la transferencia de calor y masa entre los flujos de agua y aire dentro de la torre o en la zona de relleno, que a su vez mejoran el desempeño de la torre de enfriamiento húmeda (Širok *et al.*, 2003; Naphon, 2005; Al-Waked & Behnia, 2006; Qi *et al.*, 2008; Lemouari *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2013; Ramkrishnan & Arumugam, 2013).

Dentro de las propuestas de investigación por zonas o componentes se analizó en la Tabla 1 que se pueden incluir los siguientes: la caracterización de la distribución del agua y la formación de gotas en la zona de aspersión; el análisis de la transferencia de calor y masa entre el

aire y el agua en distintas configuraciones y/o materiales en la zona de relleno, y el estudio de la evaporación y transferencia de calor y masa entre las gotas de agua y el aire en la zona de lluvia.

Se destacó la importancia e impacto ambiental que tienen las torres de enfriamiento en el sector de generación de energía, al ser el principal consumidor de agua por medio del agua de reposición para compensar las pérdidas por evaporación y arrastre, pues el consumo promedio de agua puede variar entre 1~2 l/kWh en plantas de ciclo combinado o termoeléctricas convencionales (Guerras & Martín, 2020).

Finalmente, los enfoques mencionados con anterioridad permiten contrastar la meta general de las investigaciones con el objetivo de reducir el consumo de agua de reposición, priorizar el análisis de fenómenos evaporativos en las gotas de agua y optimizar el funcionamiento de la torre de enfriamiento húmeda, principalmente en sistemas de generación de electricidad, ya que forman parte importante del nexo agua-energía en el manejo de recursos hídricos de países en desarrollo (Bauer *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2012; Gjorgiev & Sansavini, 2018). La Figura 8 resume en forma de diagrama de flujo lo mencionado en esta sección.



**Figura 8.** Relación de enfoques y encuadre en la investigación de torres de enfriamiento húmedas.

En cuanto a la validación de los modelos CFD mediante experimentos, las investigaciones consultadas no ofrecen información a

detalle del diseño del experimento. Es decir, la técnica utilizada, cómo se realizó el muestreo para la obtención de los datos reportados o la estimación de la incertidumbre de medición en los resultados obtenidos; esto se debe a que los aportes al estado del arte de las investigaciones cumplen con otros objetivos y que los autores no comparten más información al respecto. Ello puede ser un área de interés para desarrollar a futuro, en donde la investigación resalte a mayor detalle el diseño experimental para evaluar la caída de una gota de agua en torres de enfriamiento a contraflujo.

## Conclusiones

El presente trabajo mostró una comparativa de estudios realizados a torres de enfriamiento húmedas a contraflujo para sintetizar aportes, estudios y metodologías, con un enfoque hacia el consumo de agua en los procesos evaporativos por transferencia de calor en gotas de agua para calcular las pérdidas de agua por evaporación y arrastre. También se abordaron las características particulares de los estudios numéricos y experimentales.

En cuanto a los modelos matemáticos consultados, se identificaron algunas consideraciones utilizadas en investigaciones de fenómenos evaporativos en gotas de agua, y la solución de los modelos matemáticos por medio de *software* especializado para simular el flujo de fluidos, además se realizó un modelado analítico que aborda los elementos clave para el estudio de los fenómenos evaporativos en gotas de agua. Las investigaciones revisadas abordan las principales suposiciones clave en la solución de los modelos matemáticos.

Finalmente, se determinaron las características particulares para validar estudios experimentales a escala laboratorio, como la geometría utilizada, la altura de la torre de enfriamiento y los equipos de monitoreo que pueden incluir en la validación experimental, además de ser la mejor opción a tener en cuenta a la hora de implementar mejoras sobre los equipos auxiliares que componen a la torre de enfriamiento.

## Referencias

Al-Waked, R., & Behnia, M. (2006). CFD simulation of wet cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 26(4), 382-395. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.06.018

Araneo, L. T. (2012). Droplet separators for evaporative towers: Efficiency estimation by PDA. In: *ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (pp. 1-8). Heidelberg, Germany.

Asvapoositkul, W., & Treeutok, S. (2012). A simplified method on thermal performance capacity evaluation of counter flow cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 38, 160-167. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.025

Baker, D. R., & Shryock, H. A. (1961). A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance. *ASME Journal of Heat Transfer*, 83(3), 339-349. DOI: 10.1115/1.3682276

Bauer, D., Philbrick, M., Vallario, B., Battey, H., Clement, Z., & Fields, F. (2014). *The water-energy nexus: Challenges and opportunities*. Washington, DC, USA: US Department of Energy. Recuperado de [https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/pgasite/documents/webpage/pga\\_153127.pdf](https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/pgasite/documents/webpage/pga_153127.pdf)

- Bijl, D. L., Bogaart, P. W., Kram, T., Vries, B. J. M., & De Vuuren, D. P. van. (2016). Long-term water demand for electricity, industry and households. *Environmental Science and Policy*, 55, 75-86. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.09.005
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). *Fenómenos de transporte* (2ª ed.). Ciudad de México, México: Limusa Wiley.
- Blain, N., Belaud, A., & Miolane, M. (2016). Development and validation of a CFD model for numerical simulation of a large natural draft wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 105, 953-960. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.020
- Bolot, R., Li, J., & Coddet, C. (2004). Modeling of thermal plasma jets: A comparison between Phoenics and Fluent. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference* (pp. 764-769). Osaka, Japan. DOI: 10.31399/asm.cp.itsc2004p0764
- Borodulin, V., Letushko, V., Nizovtsev, M., & Sterlyagov, A. (2016). The surface temperature of free evaporating drops The surface temperature of free evaporating drops. *Journal of Physics: Conference Series*, 754(3). DOI: 10.1088/1742-6596/754/3/032018
- Cerqueira, R. F. L., Paladino, E. E., & Maliska, C. R. (2015). A computational study of the interfacial heat or mass transfer in spherical and deformed fluid particles flowing at moderate Re numbers. *Chemical Engineering Science*, 138, 741-759. DOI: 10.1016/j.ces.2015.08.054

- Chen, X., Sun, F., & Lyu, D. (2019). Field test study on water droplet diameter distribution in the rain zone of a natural draft wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114252. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114252
- Chin, K. S., Rosli, A. A., Wee, C. S. L., & Ngeow, Y. F. (2005). Isolation of Legionella from cooling towers non-medical buildings in a university campus. *Journal of Health and Translational Medicine (JUMMEC)*, 8(1), 23-27. DOI: 10.22452/jummec.vol8no1.5
- Chini, S. F., & Amirfazli, A. (2013). Understanding the evaporation of spherical drops in quiescent environment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 432, 82-88. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.05.013
- Clift, R., Grace, J. R., & Weber, M. E. (1978). *Bubbles, drops and particles*. Cambridge, USA: Academic Press.
- Collin, A., Boulet, P., Parent, G., & Lacroix, D. (2007). Numerical simulation of a water spray-radiation attenuation related to spray dynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(9), 856-868. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.005
- Cui, H., Li, N., Peng, J., Cheng, J., & Li, S. (2016). Study on the dynamic and thermal performances of a reversibly used cooling tower with upward spraying. *Energy*, 96, 268-277. DOI: 10.1016/j.energy.2015.12.065
- De-Villiers, E., & Kröger, D. G. (1999). Analysis of heat, mass, and momentum transfer in the rain zone of counterflow cooling towers. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, 121(4), 751-755. DOI: 10.1115/1.2818537

- DEQ. (2009). *Water efficiency manual. Water resources*. Recuperado de <https://www.deq.nc.gov/watereducation/water-efficiency-business-2/download>
- Duguid, H. A. (1969). *A study of the evaporation rates of small freely falling water droplets*. Recuperado de [https://scholarsmine.mst.edu/masters\\_theses/5295/](https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5295/)
- El-Wakil, M. M. (1985). *Power plant technology*. New York, St. Louis, San Francisco, USA: McGraw-Hill Book Company. Recuperado de <https://lunyx.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/03/power-plant-technology-by-m-m-el-wakil.pdf>
- Fisenko, S. P., Petruchik, A. I., & Solodukhin, A. D. (2002). Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(23), 4683-4694. DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00158-8
- Fluent ANSYS. (2013). *ANSYS fluent theory guide*. Canonsburg, USA: ANSYS Inc.
- Fluent ANSYS. (2017). *ANSYS fluent tutorial guide*. Canonsburg, USA: ANSYS Inc.
- Gharagheizi, F., Hayati, R., & Fatemi, S. (2007). Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 277-280. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.04.002

- Gilani, N., & Parpanji, F. (2018). Parametric study on the outlet water temperature in a shower cooling tower and its application in different Iranian provincial capitals. *International Journal of Thermal Sciences*, 124, 174-186. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.017
- Givoni, B. (February-March, 1997). Performance of the shower cooling tower in different climates. *Renewable Energy*, 10(2-3), 173-178. DOI: 10.1016/0960-1481(96)00059-6
- Gjorgiev, B., & Sansavini, G. (2018). Electrical power generation under policy constrained water-energy nexus. *Applied Energy*, 210, 568-579. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.011
- González-Pedraza, O. J. (2017). *Desarrollo de una metodología para el mejoramiento del diseño del aspersor de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contra flujo* (tesis doctoral). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- González-Pedraza, O. J., Pacheco-Ibarra, J. J., & Rubio-Maya, C. (2015). Conceptual design and numerical modeling of prototype counterflow cooling tower with forced draft for geothermal. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 57496, 1-8. DOI: 10.1115/IMECE2015-50634
- González-Pedraza, O. J., Pacheco-Ibarra, J. J., Rubio-Maya, C., Galván-González, S. R., & Rangel-Arista, J. A. (2018). Numerical study of the drift and evaporation of water droplets cooled down by a forced stream of air. *Applied Thermal Engineering*, 142, 292-302. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.011

- Goshayshi, H. R., & Missenden, J. F. (2000). Investigation of cooling tower packing in various arrangements. *Applied Thermal Engineering*, 20(1), 69-80. DOI: 10.1016/S1359-4311(99)00011-3
- Guella, S., Alexandrova, S., & Saboni, A. (2008). Evaporation d'une gouttelette en chute libre dans l'air. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(7), 886-898. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.07.020
- Guerras, L. S., & Martín, M. (2020). On the water footprint in power production: Sustainable design of wet cooling towers. *Applied Energy*, 263, 114620. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114620
- Heidarinejad, G., Karami, M., & Delfani, S. (2009). Numerical simulation of counter-flow wet-cooling towers. *International Journal of Refrigeration*, 32(5), 996-1002. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2008.10.008
- Hensely, J. C. (2011). *Cooling tower fundamentals*. Recuperado de <https://www.academia.edu/download/48373575/Cooling-Tower-Fundamentals.pdf>
- Ivchenko, I. N. (1979). Evaporation of spherical drops under conditions of thermostatic control of their surface. *Fluid Dyn*, 14, 790-792. DOI: 10.1007/BF01409829
- Ivchenko, I. N. (1984). The evaporation and growth of spherical droplets at intermediate Knudsen numbers. *Fluid Dynamics*, 19(2), 335-337. DOI: 10.1007/BF01091264
- Ivchenko, N., & Muradyan, S. M. (1982). Evaporation of spherical drops in a binary gas mixture at arbitrary Knudsen numbers. *Fluid Dynamics*, 19, 92-97. DOI: 10.1007/BF01090705

- Jaber, H., & Webb, R. L. (1989). Design of cooling towers by the effectiveness-NTU method. *Journal of Heat Transfer*, 111(4), 837. DOI: 10.1115/1.3250794
- Jiang, J. J., Liu, X. H., & Jiang, Y. (2013). Experimental and numerical analysis of a cross-flow closed wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 678-689. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.08.043
- Kachhwaha, S. S., Dhar, P. L., & Kales, S. R. (1998). Experimental studies and numerical simulation of evaporative cooling of air with a water spray-I. Horizontal parallel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(2), 447-464. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00133-6
- Khamis M. M., & Hassab, M. A. (2014). Innovative correlation for calculating thermal performance of counterflow wet-cooling tower. *Energy*, 74(C), 855-862. DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.059
- Klimanek, A., & Bialecki, R. A. (2009). Solution of heat and mass transfer in counterflow wet-cooling tower fills. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(6), 547-553. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.007
- Klimanek, A., Cedzich, M., & Bialecki, R. (2015). 3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection. *Applied Thermal Engineering*, 91, 824-833. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.095

- Kloppers, J. C. (2003). *A critical evaluation and refinement of the performance prediction of wet-cooling towers* (doctoral dissertation). University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa. Recuperado de <https://scholar.sun.ac.za/items/49b7c7b4-763c-487a-8ce3-494521816dca>
- Kloppers, J. C., & Kröger, D. G. (2005). The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(9), 879-884. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.03.006
- Kumar, M., & Chandra, K. (2015). Evaporating falling drop. *Procedia IUTAM*, 15, 201-206. DOI: 10.1016/j.piutam.2015.04.028
- Lemouari, M., Boumaza, M., & Kaabi, A. (2011). Experimental investigation of the hydraulic characteristics of a counter flow wet cooling tower. *Energy*, 36(10), 5815-5823. DOI: 10.1016/j.energy.2011.08.045
- Li, H. W., Duan, W. B., Wang, S. B., Zhang, X. L., Sun, B., & Hong, W. P. (2018). Numerical simulation study on different spray rates of three-area water distribution in wet cooling tower of fossil-fuel power station. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1558-1567. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.107
- Li, M., Dai, H., Xie, Y., Tao, Y., Bregnbæk, L., & Sandholt, K. (2017). Water conservation from power generation in China: A provincial level scenario towards 2030. *Applied Energy*, 208, 580-591. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.096

- Li, X., Gurgenci, H., Guan, Z., Wang, X., & Xia, L. (2019). A review of the crosswind effect on the natural draft cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 150, 250-270. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.147
- Li, X., Feng, K., Siu, Y. L., & Hubacek, K. (2012). Energy-water nexus of wind power in China: The balancing act between CO2 emissions and water consumption. *Energy Policy*, 45, 440-448. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.02.054
- Liang, G., & Mudawar, I. (2017). Review of spray cooling. Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 1174-1205. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.029
- Llano-Restrepo, M., & Monsalve-Reyes, R. (2017). Modélisation et simulation de tours de refroidissement humide à contre-courant et calcul et corrélation précis des coefficients de transfert de masse pour la prévision de la performance thermique. *International Journal of Refrigeration*, 74, 45-70. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.10.018
- Lopes, R. J., & Quinta-Ferreira, R. M. (2010). Evaluation of multiphase CFD models in gas-liquid packed-bed reactors for water pollution abatement. *Chemical Engineering Science*, 65(1), 291-297. DOI: 10.1016/j.ces.2009.06.039
- Lorenzini, G., & Saro, O. (2013). Thermal fluid dynamic modelling of a water droplet evaporating in air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62(1), 323-335. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.062

- Lu, Y., & Chen, B. (2016). Energy-water nexus in urban industrial system. *Energy Procedia*, 88, 212-217. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.150
- Lucas, M., Martínez, P. J., Ruiz, J., Kaiser, A. S., & Viedma, A. (2010). On the influence of psychrometric ambient conditions on cooling tower drift deposition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(4), 594-604. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.037
- Lucas, M., Martínez, P. J., & Viedma, A. (2009). Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 490-497. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.11.008
- Lucas, M., Martínez, P. J., & Viedma, A. (2012). Experimental determination of drift loss from a cooling tower with different drift eliminators using the chemical balance method. *International Journal of Refrigeration*, 35(6), 1779-1788. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.04.005
- Merkel, F. (1925). Verdunstungsku. *VDI-Zeitchrift*, 70, 123-128.
- Meroney, R. N. (2006). CFD prediction of cooling tower drift. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(6), 463-490. DOI: 10.1016/j.jweia.2006.01.015
- Miura, K., Miura, T., & Ohtani, S. (1977). Heat and mass transfer to and from droplets (Spray drying). *AIChE Symposium Series*, 73(163), 95-102. Recuperado de <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/6473595f08fd68d54601c2d7>

- Montazeri, H., Blocken, B., & Hensen, J. L. M. (2015). Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 83, 129-141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.022
- Muangnoi, T., Asvapoositkul, W., & Hungspreugs, P. (2014). Performance characteristics of a downward spray water-jet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 69(1-2), 165-176. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.019
- Murrant, D., Quinn, A., Chapman, L., & Heaton, C. (2017). Water use of the UK thermal electricity generation fleet by 2050: Part 1 identifying the problem. *Energy Policy*, 108, 844-858. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.011
- Nahavandi, A. N., & Serico, B. J. (1975). The effect of evaporation losses in the analysis of crossflow cooling towers. *Nuclear Engineering and Design*, 35(2), 269-282. DOI: 10.1016/0029-5493(75)90201-0
- Naik, B. K., & Muthukumar, P. (2017). A novel approach for performance assessment of mechanical draft wet cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 121, 14-26. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.042
- Naphon, P. (2005). Study on the heat transfer characteristics of an evaporative cooling tower. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(8), 1066-1074. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.016

- Nasrabadi, M., & Finn, D. P. (2014). Mathematical modeling of a low temperature low approach direct cooling tower for the provision of high temperature chilled water for conditioning of building spaces. *Applied Thermal Engineering*, 64(1-2), 273-282. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.025
- Nuyttens, D., Baetens, K., De Schampheleire, M., & Sonck, B. (2007). Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*, 97(3), 333-345. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001
- Papaefthimiou, V. D., Rogdakis, E. D., Koronaki, I. P., & Zannis, T. C. (2012). Thermodynamic study of the effects of ambient air conditions on the thermal performance characteristics of a closed wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 33, 199-207. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.09.035
- Pearlmutter, D., Erell, E., Etzion, Y., Meir, I. A., & Di, H. (1996). Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower. *Energy and Buildings*, 23(3), 191-197. DOI: 10.1016/0378-7788(95)00944-2
- Picardo, J. R., & Variyar, J. E. (2012). The Merkel equation revisited: A novel method to compute the packed height of a cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 57, 167-172. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.12.016
- Qi, X., Liu, Z., & Li, D. (2007). Performance characteristics of a shower cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 193-203. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.04.021

- Qi, X., Liu, Z., & Li, D. (2008). Prediction of the performance of a shower cooling tower based on projection pursuit regression. *Applied Thermal Engineering*, 28(8-9), 1031-1038. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2007.06.029
- Qureshi, B. A., & Zubair, S. M. (2006). A complete model of wet cooling towers with fouling in fills. *Applied Thermal Engineering*, 26(16), 1982-1989. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.01.010
- Ramkrishnan, R., & Arumugam, R. (2013). Experimental study of cooling tower performance using ceramic tile packing. *Processing and Application of Ceramics*, 7(1), 21-27. DOI: 10.2298/pac1301021r
- Ranz, W. E., & Marshall, W. R. (1952). Evaporation from drops. *Chemical Engineering Progress*, 48, 141-146. Recuperado de <https://dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/2000%20CE/PDF/Che%20Eng%20Pro48,%20141.pdf>
- Rezaei, E., Shafiei, S., & Abdollahnezhad, A. (2010). Reducing water consumption of an industrial plant cooling unit using hybrid cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 51(2), 311-319. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.09.027
- Rotar, M., Širok, B., Drobnič, B., Novak, M., & Donevski, B. (2005). A numerical analysis of the local anomalies in a natural-draft cooling tower. *Heat Transfer Engineering*, 26(9), 61-72. DOI: 10.1080/01457630500207592
- Ruiz, J., Cutillas, C. G., Kaiser, A. S., Ballesta, M., Zamora, B., & Lucas, M. (2016). Experimental study of drift deposition from mechanical draft cooling towers in urban environments. *Energy and Buildings*, 125, 181-195. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.076

- Ruiz, J., Cutillas, C. G., Kaiser, A. S., Zamora, B., Sadafi, H., & Lucas, M. (2019). Experimental study on pressure loss and collection efficiency of drift eliminators. *Applied Thermal Engineering*, 149, 94-104. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.023
- Ruiz, J., Kaiser, A. S., & Lucas, M. (2017). Experimental determination of drift and PM10 cooling tower emissions: Influence of components and operating conditions. *Environmental Pollution*, 230, 422-431. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.06.073
- Sánchez, F., Kaiser, A. S., Zamora, B., Ruiz, J., & Lucas, M. (2015). Prediction of the lifetime of droplets emitted from mechanical cooling towers by numerical investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 1190-1206. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.014
- Sartor, J. D., & Abbott, C. E. (1975). Prediction and measurement of the accelerated motion of water drops in air. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 14(2), 232-239. DOI: 10.1175/1520-0450(1975)014<0232:PAMOTA>2.0.CO;2
- Shen, W., Chen, X., Qiu, J., Hayward, J. A., Sayeef, S., Osman, P., Meng, K., & Dong, Z. Y. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110301
- Shublaq, M., & Sleiti, A. K. (2020). Experimental analysis of water evaporation losses in cooling towers using filters. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115418. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115418

- Sirena, J. A. (2013). Electrical-fluid dynamic performance of mechanical draft water cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 54(1), 185-189. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.009
- Širok, B., Blagojevič, B., Novak, M., Hočevár, M., & Jere, F. (2003). Energy and mass transfer phenomena in natural draft cooling towers. *Heat Transfer Engineering*, 24(3), 66-75. DOI: 10.1080/01457630304061
- Song, Y., Wu, G., & Song, B. (2021). Water balance test, analysis and application of the wet cooling tower. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 898, 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/898/1/012008
- Srinivasan, S., Kholod, N., Chaturvedi, V., Ghosh, P. P., Mathur, R., Clarke, L., Evans, M., Hejazi, M., Kanudia, A., Nagar Koti, P., Liu, B., Parikh, K. S., Ali, M. S., & Sharma, K. (2018). Water for electricity in India: A multi-model study of future challenges and linkages to climate change mitigation. *Applied Energy*, 210, 673-684. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.079
- Stull, R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(11), 2267-2269. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0143.1
- Sun, Y., Guan, Z., Gurgenci, H., Li, X., & Hooman, K. (2017). A study on multi-nozzle arrangement for spray cooling system in natural draft dry cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 124, 795-814. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.157

- Sureshkumar, R., Dhar, P. L., & Kale, S. R. (2007). Effects of spray modeling on heat and mass transfer in air-water spray systems in parallel flow. *Chemical Engineering Science*, 34, 878-886. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.03.001
- Taghian, S., & Ahmadikia, H. (2017). Retrofit of a wet cooling tower in order to reduce water and fan power consumption using a wet/dry approach. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1002-1014. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.069
- Terblanche, R., Reuter, H. C. R., & Kröger, D. G. (2009). Drop size distribution below different wet-cooling tower fills. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9), 1552-1560. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.013
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat exchanger design handbook* (2<sup>nd</sup> ed.). Boca Raton, USA: CRC Press. DOI: 10.1201/b14877
- Tissot, J., Boulet, P., Trinquet, F., Fournaison, L., & MacChi-Tejeda, H. (2011). Air cooling by evaporating droplets in the upward flow of a condenser. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(11), 2122-2131. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.06.004
- Tomás, A. C. C., Araujo, S. D. O., Paes, M. D., Primo, A. R. M., Da Costa, J. A. P., & Ochoa, A. A. V. (2018). Experimental analysis of the performance of new alternative materials for cooling tower fill. *Applied Thermal Engineering*, 144(August), 444-456. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.08.076
- Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., & Tao, Y. (2023). *Computational fluid dynamics: A practical approach*. Maryland Heights, USA: Elsevier.

- Velandia, J. S., Chery, M., & Lopez, O. D. (2016). Computational study of the air flow dynamics in an induced draft cooling tower. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38(8), 2393-2401. DOI: 10.1007/s40430-015-0348-y
- Versteeg, H. K. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, 2/E*. Chennai, India: Pearson Education India.
- Vitkovic, P. (2015). Water distribution characteristics of spray nozzles in a cooling tower. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(1), 1-7. DOI: 10.1051/epjconf/20159202109
- Wan, Y., Ren, C., & Xing, L. (2017). An approach to the analysis of heat and mass transfer characteristics in indirect evaporative cooling with counter flow configurations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 1750-1763. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.019
- Yang, J., Stratman, J., & Rasmussen, E. (2015). *Cooling tower drift eliminator. Patent No. 002015*. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/US20160356549A1/en>
- Yu, Z., Sun, C., Fang, J., Zhang, L., Hu, Y., & Bao, B. (2021). Water recovery efficiency improvement using the enhanced structure of the mist eliminator. *Process Safety and Environmental Protection*, 154, 433-446. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.018
- Zamora, B., & Kaiser, A. S. (2011). Comparative efficiency evaluations of four types of cooling tower drift eliminator, by numerical investigation. *Chemical Engineering Science*, 66(6), 1232-1245. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.018

- Zawawi, M. H., Saleha, A., Salwa, A., Hassan, N. H., Zahari, N. M., Ramli, M. Z., & Muda, Z. C. (2018, November). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). In: *AIP Conference Proceedings*, 2030(1), 1-8. DOI: 10.1063/1.5066893
- Zhao, Y., Sun, F., Long, G., Huang, X., Huang, W., & Lyv, D. (2016). Comparative study on the cooling characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower and the usual cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 116(May), 150-164. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.02.071
- Zunaid, M., Murtaza, Q., & Gautam, S. (2017). Energy and performance analysis of multi droplets shower cooling tower at different inlet water temperatures for air cooling application. *Applied Thermal Engineering*, 121, 1070-1079. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.157

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-07

Artículos

## **Rendimiento y productividad del agua en cultivos de invierno bajo riego deficitario**

### **Yield and water productivity in winter crops under deficit irrigation**

Sergio Arturo Ortiz-Díaz<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6948-6385>

Pablo Preciado-Rangel<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3450-4739>

Manuel Fortis-Hernández<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7374-8779>

Ricardo Israel Ramírez-Gottfried<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6694-642X>

Selenne Yuridia Márquez-Guerrero<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5910-8794>

Jessica Janeth Rocha-Santillano<sup>6</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4879-2321>

Arturo Reyes-González<sup>7</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6983-0905>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, [sergio.ortdiaz@gmail.com](mailto:sergio.ortdiaz@gmail.com)

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, ppreciador@yahoo.com.mx

<sup>3</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, fortismanuel@hotmail.com

<sup>4</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, Coahuila, México, gottfried\_ricardo@hotmail.com

<sup>5</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, selenne.mg@torreon.tecnm.mx

<sup>6</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, Coahuila, México, janethrocha17@gmail.com

<sup>7</sup>Campo Experimental La Laguna- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Coahuila, México, reyes.arturo@inifap.gob.mx

Autor para correspondencia: Arturo Reyes-González, reyes.arturo@inifap.gob.mx

## Resumen

El riego deficitario es una estrategia para incrementar la productividad del agua especialmente en las zonas áridas y semiáridas. Con el objetivo de evaluar el efecto del riego deficitario (60, 80 y 100 de la evapotranspiración, ET) sobre el rendimiento y la productividad del agua en cultivos de invierno, se estableció un trabajo de campo, para lo cual se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los porcentajes de ET corresponden a la parcela principal (60, 80 y 100 %) bajo un sistema de riego por goteo y un testigo

con riego por inundación los cultivos de invierno: cebada (*Hordeum vulgare* L.); canola (*Brassica napus* L.); triticale (*X Triticosecale Wittmack*); avena (*Avena sativa* L.), y cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) como subparcelas. Los resultados muestran que el rendimiento de biomasa de las especies y la productividad del agua (PA) dependen del riego deficitario. Con la ET de 80 y 100 % se obtuvieron los mayores rendimientos de forraje verde y seco en la cebada, triticale y avena, respectivamente. La mayor productividad del agua corresponde a los tratamientos con 60 y 80 % de ET (4 y 3.75 kg m<sup>-3</sup>). El riego deficitario con el 60 % de ET permite mantener el potencial forrajero y la productividad del agua en los cultivos de invierno.

**Palabras clave:** evapotranspiración, riego por goteo, potencial forrajero.

## Abstract

Deficit irrigation is a strategy to increase water productivity, especially in arid and semi-arid areas. With the objective of evaluating the effect of deficit irrigation (60, 80 and 100 of evapotranspiration (ET) on the yield and productivity of water in winter crops, field work was established using an experimental design of plots divided into random blocks with four repetitions. The ET percentages correspond to main plot (60, 80 and 100 %) under a drip irrigation system and a control with flood irrigation, the winter crops: barley (*Hordeum vulgare* L.); canola (*Brassica napus* L.); triticale (*X Triticosecale Wittmack*); oats (*Avena sativa* L.), and safflower (*Carthamus tinctorius* L.) as subplots. The results show that the biomass yield of the species and water productivity (PA) depend on deficit irrigation. With the 80 and 100 % of ET, the highest yields of green and dry forage were obtained in barley, triticale and oats respectively. The

highest water productivity corresponds to the treatments with 60 and 80 % ET (4 y 3.75 kg m<sup>-3</sup>). Deficit irrigation at 60 % ET allows maintaining forage potential and water productivity in winter crops.

**Keywords:** Evapotranspiration, drip irrigation, forage potential.

Recibido: 17/06/2024

Aceptado: 26/01/2025

Publicado *ahead of print*: 30/01/2025

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

La producción de leche en México en 2020 fue de 12 mil 554 millones de litros, la Comarca Lagunera aporta el 21 % de la producción nacional, que representa una de las principales actividades económicas de la región (SIAP, 2021). Al ser la principal cuenca lechera del país demanda grandes cantidades de forraje por año; la principal fuente de alimentación se basa en maíz y alfalfa (Sader, 2021); sin embargo, el maíz se produce solo en el ciclo primavera-verano y en el invierno la producción de alfalfa disminuye debido a que las condiciones climáticas no son favorables para su desarrollo.

Ante esta situación, el empleo de especies forrajeras adaptables a las condiciones climáticas y edáficas prevalecientes durante el ciclo otoño-invierno es de vital importancia. Cultivos como triticale, cebada y cártamo son especies capaces de desarrollarse en condiciones limitadas de agua de riego y con potencial para producir forrajes de alto valor nutricional

durante el periodo de invierno (Ochoa-Espinoza *et al.*, 2022a). La avena es un cultivo de alta adaptabilidad en zonas áridas y semiáridas, de bajo requerimiento hídrico y con producciones de forraje de alto valor energético (Servin-Palestina, Sánchez-Gutiérrez, Ramírez-Valle, Galindo-Reyes, & Gutiérrez-Bañuelos, 2018). Otra alternativa para estas condiciones edafoclimáticas es la canola, la cual presenta tolerancia a las condiciones limitadas de agua y salinidad; en estas condiciones soporta bajas temperaturas y produce forrajes de buena calidad con rendimientos de proteína cruda (PC) y energía neta de lactancia (ENL) similares a cultivares de primavera (Reta-Sánchez, Serrato-Corona, Quiroga-Garza, Figueroa-Viramontes, & Gaytán-Mascorro, 2017). Las especies antes mencionadas pudieran incrementar el potencial forrajero en el ciclo otoño-invierno en la Laguna.

Una de las principales limitantes para la producción de forrajes en la Comarca Lagunera es la baja disponibilidad de agua, ya que para satisfacer la gran demanda de alimento para el ganado bovino se requiere de altos volúmenes de agua de riego (Reyes, Franco, Hernández, & Maltos, 2020), por lo que es necesario utilizar técnicas que permitan obtener mayor productividad del agua y aumentar los rendimientos de los cultivos. El sistema de riego por goteo subterráneo es un sistema que minimiza la evaporación del agua de la superficie del suelo, lo que resulta en mayor producción de biomasa e incremento en la eficiencia en el uso de agua (Reyes *et al.*, 2023).

Por otro lado, la evapotranspiración (ET) es fundamental para la programación del riego en los cultivos (Reyes *et al.*, 2023). Diferentes porcentajes de ET se han aplicado en la calendarización del riego en varios cultivos, que incluyen maíz (Zavala-Borrego, Reyes-González, Álvarez-Reyna, Cano-Ríos, & Rodríguez-Moreno, 2022); alfalfa (Godoy-Ávila,

Pérez-Gutiérrez, Torres, Hermosillo, & Reyes, 2003); trigo (Alghory & Yazar, 2019), y avena (Reyes-González *et al.*, 2011); sin embargo, para cebada, canola y cártamo se tiene poca información para la región.

El riego deficitario es una estrategia de ahorro de agua comúnmente utilizada en las zonas áridas y semiáridas. Consiste en aplicar cantidades de agua inferiores a los requerimientos hídricos del cultivo (Flores, Ojeda, Flores, Sifuentes, & Mejía, 2013).

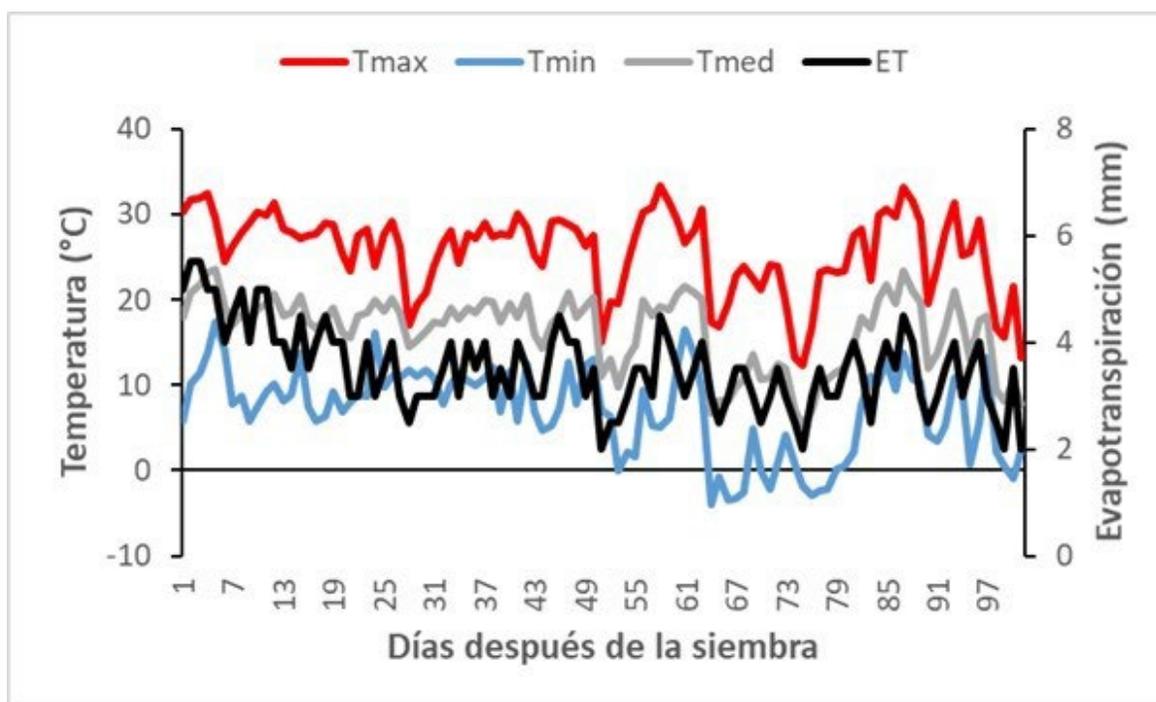
La aplicación de diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y déficit hídrico puede mantener el potencial productivo de los cultivos de invierno. Debido a lo anteriormente mencionado, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del riego deficitario (100, 80 y 60 % de ET) sobre el rendimiento y la productividad del agua en cultivos de invierno bajo un sistema de riego por goteo y riego por inundación en la Comarca Lagunera. La hipótesis planteada es que el rendimiento y productividad del agua se mantienen al aplicar diferentes niveles de irrigación basado en porcentaje de evapotranspiración y déficit hídrico en la Comarca Lagunera.

## Materiales y métodos

### Localización del experimento

El presente estudio se llevó a cabo durante el ciclo otoño-invierno 2021-2022 en el Campo Experimental "La Laguna" (CELALA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Matamoros, Coahuila, México (25° 32' N, 103° 14' O y 1 150 msnm). El suelo del sitio experimental presenta una textura franco-arcillosa, capacidad de campo de 35.2 %, punto de marchitez permanente

de 20.57 %, densidad aparente de  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$ , pH alcalino, bajo en materia orgánica, fósforo y nitrógeno disponible. El clima seco semicálido (Bwh) con humedad atmosférica escasa, temperatura media anual de  $22.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que la precipitación anual promedio es de  $215.5 \text{ mm}$  y evaporación media anual de  $2000 \text{ mm}$  (García, 2004). Las condiciones climáticas prevalecientes durante el desarrollo del cultivo fueron las siguientes: la temperatura mínima fue de orden creciente con  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta alcanzar  $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . La máxima fue de  $16.9$  a  $33.3 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura media durante el ciclo fue en el rango de  $7$  a  $23.5 \text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 1). La evapotranspiración (ET) promedio fue de  $3.5 \text{ mm día}^{-1}$  durante el ciclo de producción.



**Figura 1.** Temperaturas mínimas, máximas, medias y evapotranspiración durante el ciclo de producción en cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación.

## Preparación del terreno

La preparación del terreno consistió en subsolación, barbecho, rastra, nivelación y colocación de cinta de riego. Se evaluaron cinco especies de cultivos: 1) cebada Valencia; 2) Canola IMC 205; 3) triticale río Nazas; 4) avena Cuauhtémoc, y 5) cártamo Forrcart 2020. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET se consideraron como parcela grande (100, 80 y 60 % de ET) y un testigo con riego por inundación, mientras que las parcelas chicas se conformaron por las diferentes especies de cultivos (cebada, canola, triticale, avena y cártamo). Cada parcela experimental constó de 15 hileras, con una distancia entre surcos de 0.20 y 5 m de longitud (15 m<sup>2</sup>). La siembra se realizó en seco de forma manual el 30 de octubre de 2021, con densidades de 15 a 80 kg ha<sup>-1</sup>. La dosis de fertilización utilizada para los diferentes cultivos fue de 200-100-00 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O); se utilizó como fuente de nitrógeno urea CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> y sulfato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, y como fuente de fósforo el fosfato monoamónico (MAP) NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. A la siembra se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno; el resto del nitrógeno se aplicó cada 15 días durante el crecimiento del cultivo acorde con su requerimiento mediante el sistema de riego por goteo usando un inyector Venturi. En el riego por inundación se aplicó la otra mitad de nitrógeno al voleo de forma manual a los 25 días después de la siembra (DDS).

## Riegos

La cinta de riego utilizada fue RO-DRIP 8 mil (Rivulis Irrigation Inc., San Diego, CA, EUA) con espesor de pared de 0.2 mm, diámetro interior de 16 mm, con emisores a 0.2 m de separación y un gasto de 0.5 l h<sup>-1</sup> por emisor. El sistema de riego operó a una presión de 55.15 kilo pascales (8 PSI), con intervalo de riego cada tercer día. En el riego por inundación o superficial, la frecuencia de riego fue con intervalos de 25 días entre ellos. Para la estimación de la ET de referencia se utilizó un atmómetro (ETgage, modelo A comercializado por ETgage Company Loveland, Colorado, EUA), ubicado a 50 m del sitio experimental. Las lecturas fueron diarias y se multiplicaron por el coeficiente de cultivo (Kc) de cada cultivo para obtener la evapotranspiración de los cultivos (ETc).

## Variables evaluadas

### Potencial hídrico foliar

La medición del potencial hídrico foliar ( $\Psi_h$ ) se realizó semanalmente durante el ciclo de producción con la ayuda de la bomba de presión propuesta por Scholander, Bradstreet, Hemmingsen y Hammel (1965). Se hicieron dos muestreos por tratamiento y repetición entre las 12:00 y 14:00 horas del día. Se seleccionaron dos hojas sanas de la parte superior del cultivo de cada tratamiento y repetición, las cuales se cubrieron con tela humedecida para evitar la pérdida de humedad en el traslado antes de su medición (Alghory & Yazar, 2019).

## Temperatura del dosel del cultivo

Para medir la temperatura del dosel del cultivo ( $^{\circ}\text{C}$ ) se utilizó un termómetro digital infrarrojo modelo 42530 (Extech instruments Inc., Boston, MA, EUA), con campo de visión de 8:1 (a 8 pies = 2.4 m) de distancia. Las temperaturas se tomaron cada semana bajo radiación directa a partir de los 35 DDS. Se tomaron dos lecturas por tratamiento y repetición a una altura de 25 cm por encima del dosel del cultivo con ángulo de inclinación de  $20^{\circ}$  con respecto al nivel perpendicular del dosel del cultivo.

## Altura de las plantas

La altura final de las plantas se midió con una cinta métrica desde la base del tallo hasta la espiga o última hoja en tres plantas escogidas al azar en cada tratamiento y repetición al momento de la cosecha, y se promediaron.

## Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) se obtuvo al utilizar el ceptómetro PAR/LAI modelo Lp-80 de AccuPAR (Decagon Devices, Inc. Pullman, WA, EUA). La barra del ceptómetro se colocó en un ángulo de  $45^{\circ}$  a través de los surcos en cada uno de los cultivos para medir la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). El IAF se midió entre las 12:00 y 14:00 horas, con tres lecturas por encima y por debajo del dosel del cultivo en cada tratamiento y repetición. Las lecturas se tomaron en días despejados con intervalos de siete días.

## Rendimiento

La cosecha de cebada, triticale y avena se realizó cuando la maduración del grano presentó un estado lechoso masoso (Xu *et al.*, 1995). En canola, la cosecha se efectuó en la fase final de la floración. En el cártamo, la cosecha se llevó a cabo en la fase de yemas florales (Espinoza *et al.*, 2023). Se determinó el rendimiento de forraje verde (FV) y forraje seco (FS) para cada una de las especies cultivadas. La producción de forraje verde se calculó al pesar 2 m<sup>2</sup> de biomasa de cada uno de los cultivos y se promediaron en cada unidad experimental de cada tratamiento y repetición. Posteriormente, se tomó una muestra de 500 g y se secó en una estufa de aire forzado (UF 260 Plus, Memmert, Alemania) a una temperatura de 65 °C hasta alcanzar un peso constante (Buthelezi, Mupangwa, Muchenje, & Nherera, 2019) para determinar el porcentaje de materia seca (MS). El rendimiento de forraje seco de cada especie se estimó con la producción de forraje verde y el porcentaje de MS.

## Productividad del agua

La productividad de agua (PA) se obtuvo al dividir el rendimiento seco cosechado (kg) de cada uno de los forrajes entre el volumen total de agua aplicada (m<sup>3</sup>) durante el ciclo de producción en cada tratamiento (Fernández & Camacho, 2005).

## Análisis estadístico

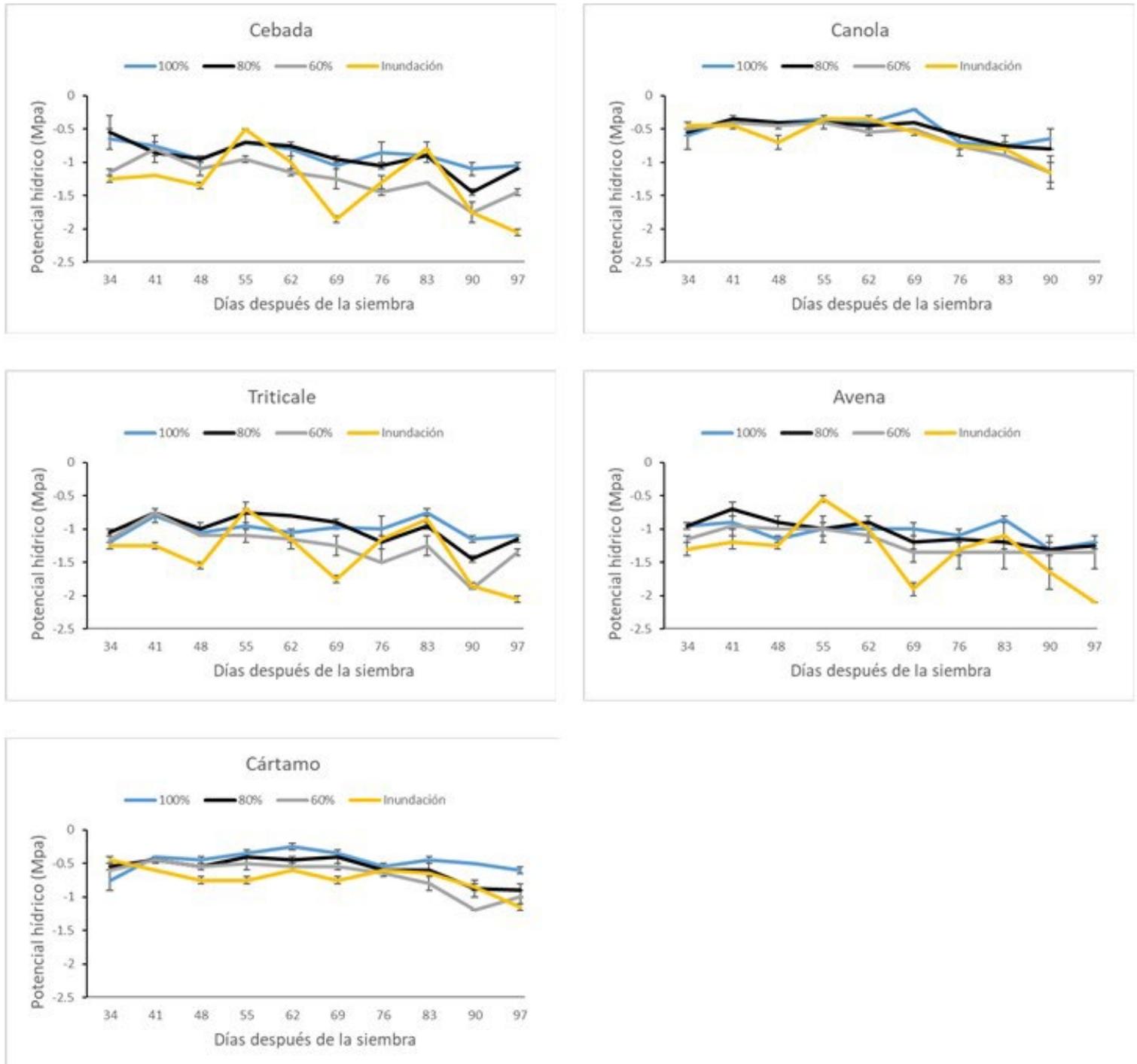
Se utilizó un modelo matemático lineal de efectos fijos para el análisis de varianza para el procesamiento estadístico de las variables evaluadas.

Una vez comprobada la existencia de diferencias se usó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) empleando el paquete estadístico Statistical Analysis System Institute, versión 9.3. (SAS Institute Inc., Cary, NC. EUA).

## Resultados y discusión

### Potencial hídrico foliar ( $\Psi_h$ )

Los distintos tratamientos de riego afectan el potencial hídrico de la hoja de los cultivos evaluados (Figura 2). Los tratamientos de 80 y 100 % de ET presentaron la mayor condición hídrica a lo largo del ciclo de producción en los diferentes cultivos con un rango de -0.2 a -1.45 MPa. Por el contrario, los tratamientos de riego con el 60 % de ET y riego por inundación presentaron mayor estrés hídrico (de -0.3 a -2.10 MPa) debido al contenido de humedad del suelo. Los tratamientos con mayores niveles de humedad en el suelo presentan potencial hídrico más positivo, mientras que la deficiencia de humedad genera valores más negativos (May-Lara, Pérez-Gutiérrez, Ruiz-Sánchez, Ic-Caamal, & García-Ramírez, 2011). Valores similares de potencial hídrico fueron reportado por Reyes-González *et al.* (2011) (-0.3 a -2.0 MPa), al evaluar variedades de avena forrajera y diferentes porcentajes de ET. Similar tendencia en el  $\Psi_h$  fue reportada por Zavala-Borrego *et al.* (2022) en sorgo forrajero, donde los tratamientos de 60 % de la ET y riego por gravedad registraron los valores más negativos de  $\Psi_h$ .

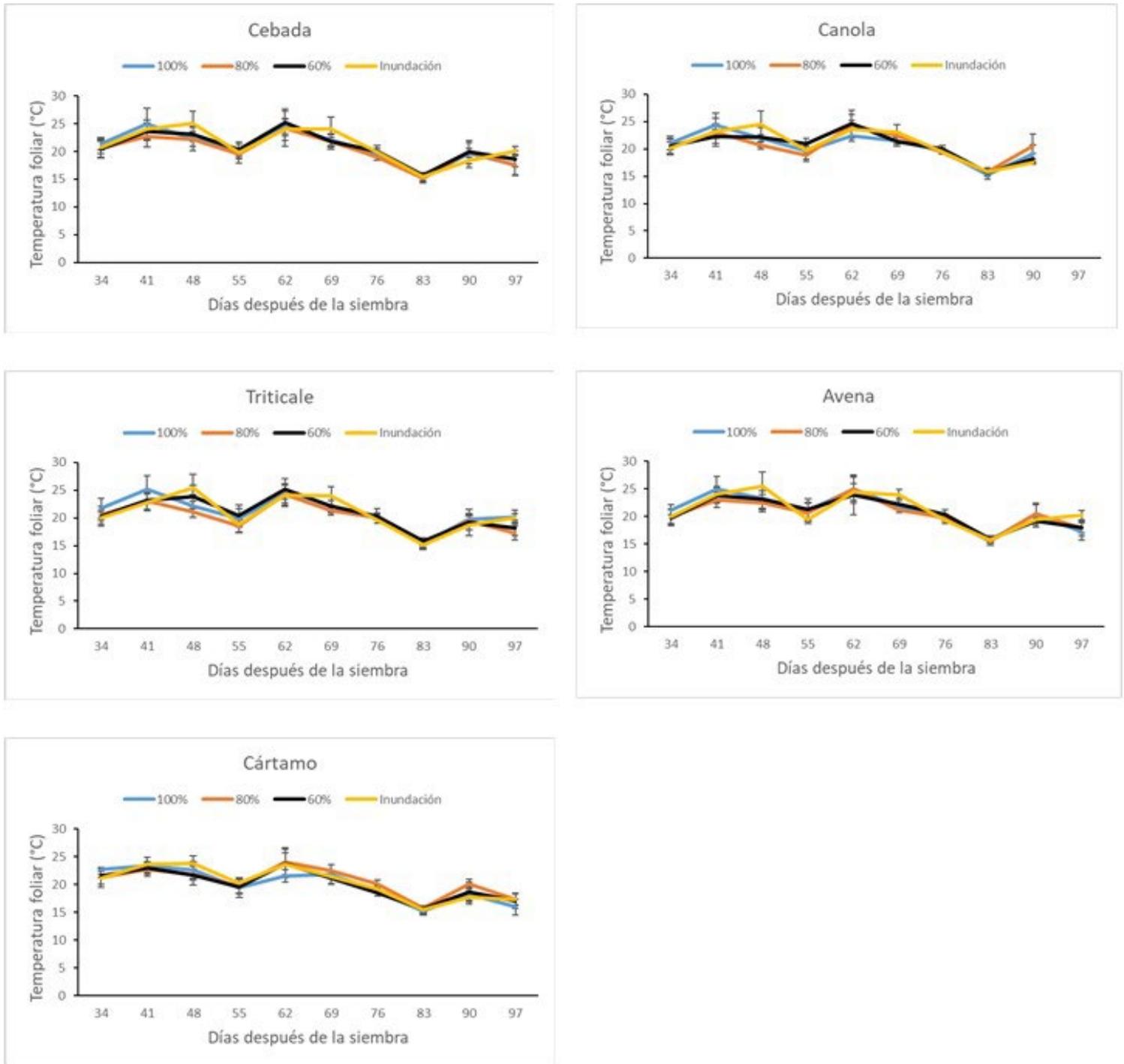


**Figura 2.** Potencial hídrico foliar en cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación. Las barras verticales indican la desviación estándar.

El cártamo y canola presentaron el mayor comportamiento de  $\Psi_h$  con valores menos negativo en los diferentes tratamientos de riego; tal comportamiento se asocia con que son especies de menor requerimiento hídrico (Reta-Sánchez *et al.*, 2017). En contraste, las especies de avena, triticale y cebada reportaron los valores más negativos; dichos valores correspondieron al tratamiento de riego por inundación, en el cual se mostraron mayores altibajos de potencial hídrico.

### Temperatura del dosel

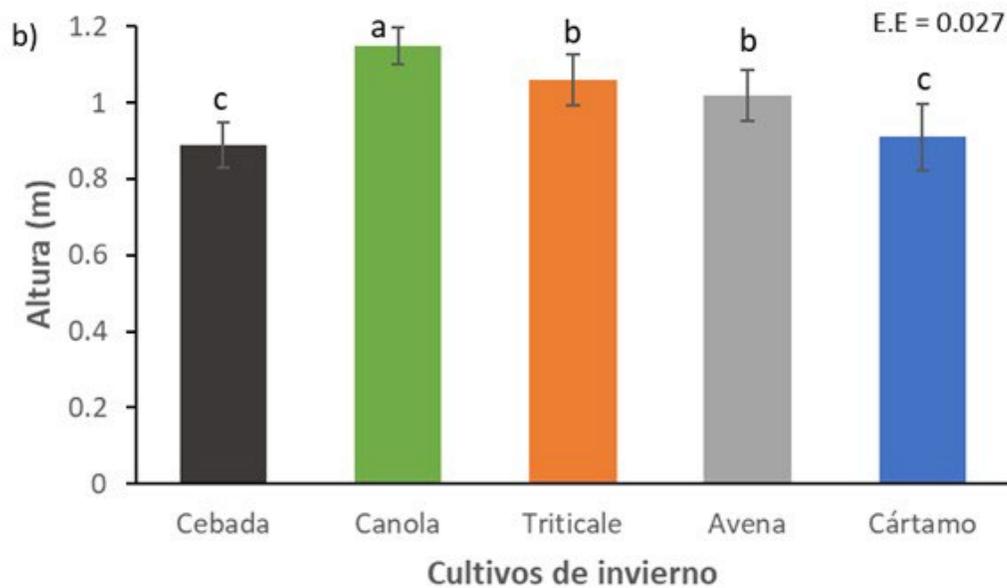
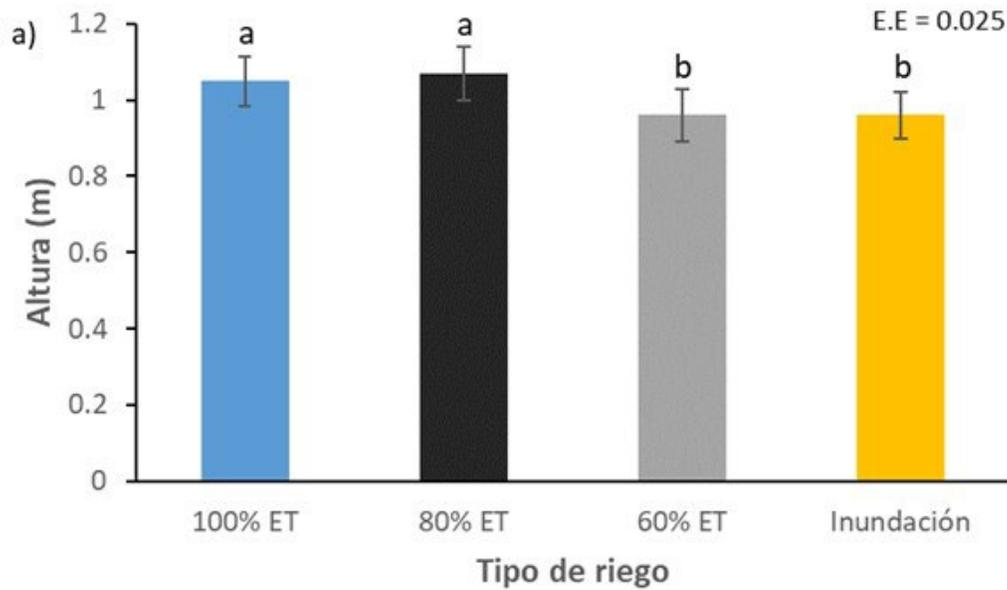
La temperatura del dosel fue similar entre las diferentes especies cultivadas (Figura 3). Las temperaturas más altas se registraron a los 48 DDS, con valores de 25.4 y 25.5 °C en triticale y avena en el tratamiento de inundación; mientras que los valores mínimos se presentaron a los 83 DDS en todas las especies y tratamientos de riego. En general, las temperaturas más altas se registraron en el tratamiento de 60 % de ET y riego por inundación; a su vez, fueron los tratamientos que presentaron valores de  $\Psi_h$  más negativos, lo que indica déficit de humedad, lo cual dio como resultado mayor temperatura foliar (Him-Lo *et al.*, 2020). En este mismo contexto, Reyes-González *et al.* (2019) observaron que niveles bajos de humedad reducen la transpiración debido al cierre estomático y provocan un incremento en la temperatura foliar del cultivo.



**Figura 3.** Temperatura del dosel en cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación. Las barras verticales señalan la desviación estándar.

## Altura de las plantas

La altura de planta fue afectada positivamente por los diferentes tratamientos; la mayor altura de planta se alcanzó en los tratamientos de 80 y 100 % de ET. La menor altura se encontró en los tratamientos de 60 % de ET y el riego por gravedad (Figura 4a); estos últimos fueron estadísticamente iguales. Dicha respuesta se debe a que en los tratamientos de 80 y 100 % de ET, el intervalo de riego y cantidad aplicada favorecen al aprovechamiento de la humedad en la zona radical y al crecimiento del cultivo, lo cual genera mayor producción de biomasa (Reyes *et al.*, 2023).



**Figura 4.** Altura de planta en diferente tipo de riego (a) y en diversos cultivos de invierno (b). Las barras verticales indican la desviación estándar.

En lo que se refiere a las especies de invierno, el cultivo de canola fue el que registró la mayor altura, por lo que es diferente estadísticamente al resto de ellos. El triticale y la avena fueron estadísticamente similares, aunque la menor altura se registró en el cártamo y la cebada, los cuales fueron estadísticamente iguales (Figura 4b).

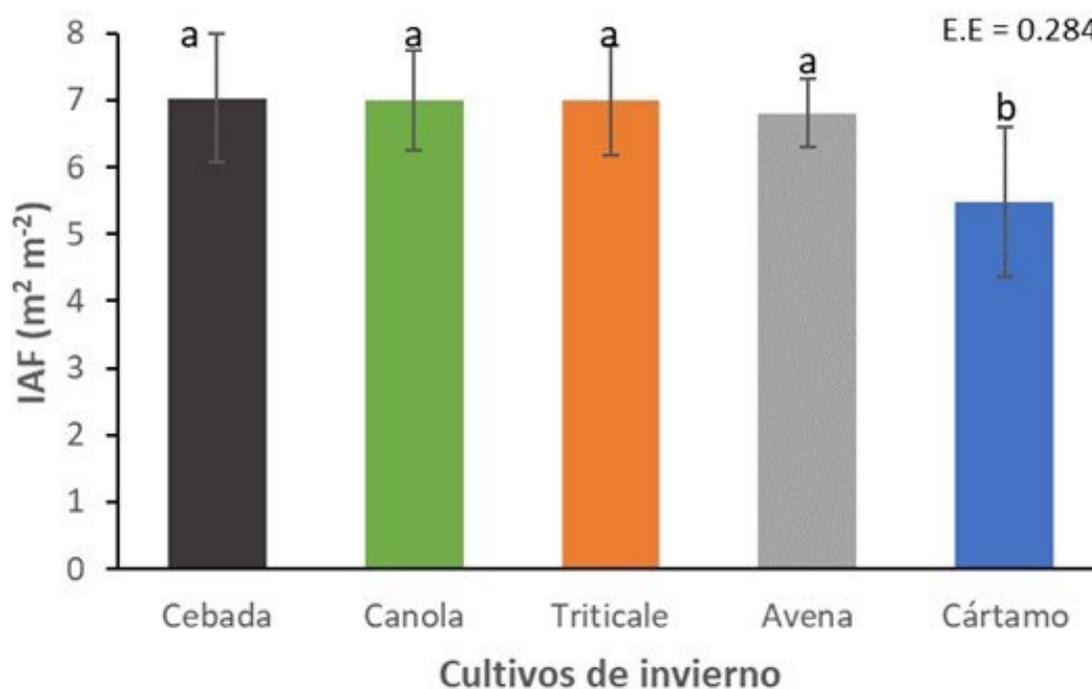
Zavala-Borrego *et al.* (2022) también reportaron una mayor altura de planta con el 80 y 100 % de la ET al emplear un sistema de riego por goteo, en comparación con el sistema de riego por gravedad. A su vez, Ochoa-Espinoza *et al.* (2022b) obtuvieron alturas similares en la evaluación del potencial forrajero de cártamo y cereales de grano pequeño en dos ciclos de producción al utilizar especies similares a las de la presente investigación.

## Índice de área foliar (IAF)

Aunque no hubo diferencia estadística entre el tipo de riego, los resultados mostraron mayor IAF en los tratamientos de 80 y 100 % de ET con respecto a los tratamientos de 60 % de ET y el riego por gravedad. Este resultado se debe probablemente a que los diferentes niveles de humedad presentes en el suelo condicionan el potencial de turgencia y cierre estomático, lo que limita la producción de biomasa. Al respecto, Reyes *et al.* (2023) señalan que la restricción de agua limita el desarrollo adecuado de las hojas, por lo que la capacidad de la planta para captar la energía luminosa se ve afectada, al igual que los valores de IAF.

Por otro lado, en las especies de invierno sí hubo diferencia estadística entre ellas, el cártamo fue el que registró el menor valor de IAF (Figura 5). Esto se debió a que el cártamo crece sobre un tallo

principal, mientras que los otros cereales amacollan (Prado, Gallardo, Kruk, & Miralles, 2017). Cabe señalar que la canola no amacolla, sin embargo las hojas son grandes, por lo que ocupa mayor índice de área foliar. Esta es una característica importante que depende de la intercepción solar, la cual determina la cantidad de forraje durante el ciclo de producción de los cultivos (Reta, Sánchez, Ochoa, Reyes, & Rodríguez, 2023).

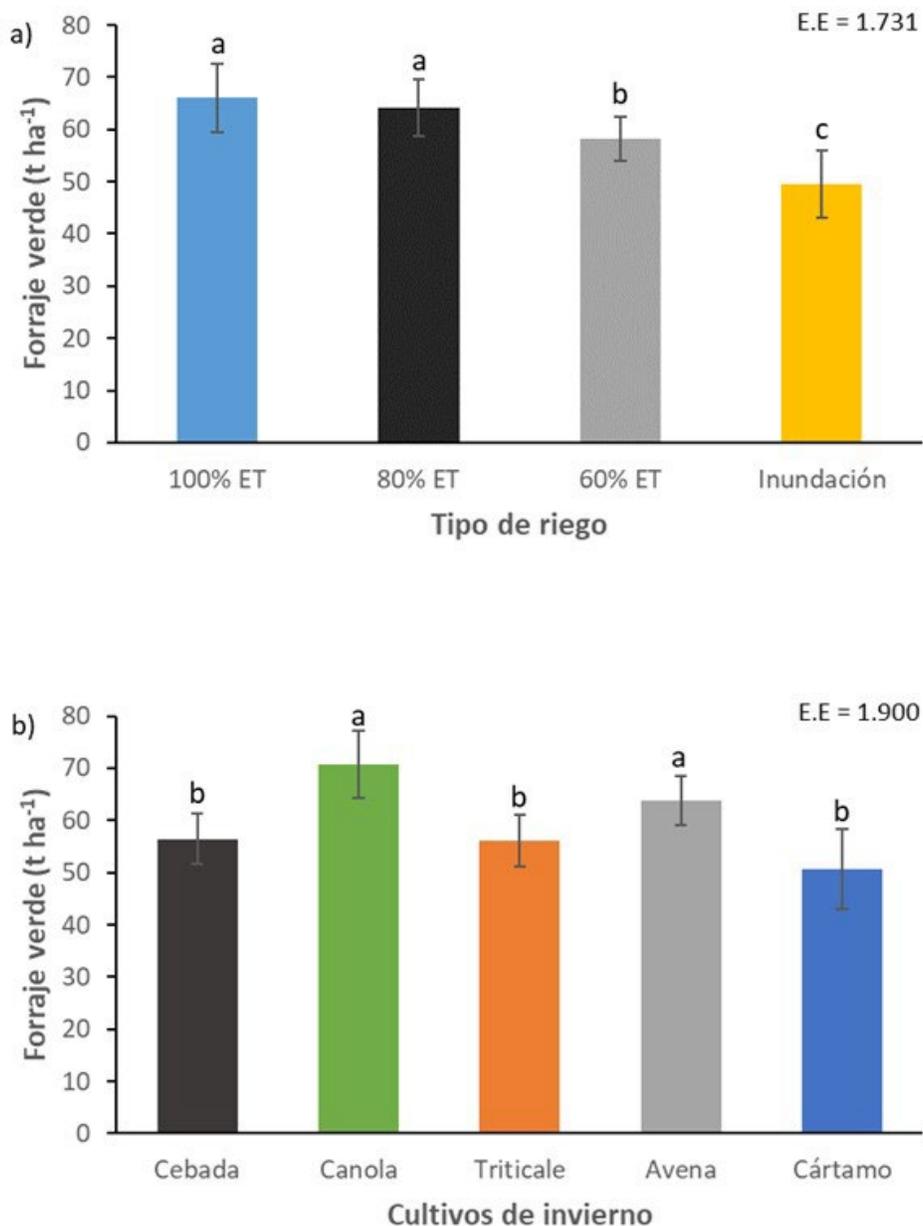


**Figura 5.** Comportamiento de índice de área foliar en cultivos de invierno. Las barras verticales indican la desviación estándar.

Los resultados de esta investigación fueron superiores a los obtenidos por Ochoa-Espinoza *et al.* (2022a), con valores de índice de área foliar de 5.34 a 7.95 en cinco especies forrajeras establecidas bajo riego por inundación en la Comarca Lagunera.

## Forraje verde (FV)

En la producción de FV se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de riego y las especies evaluadas. La mayor producción de FV se observó en los tratamientos de 80 y 100 % de ET con rendimientos promedio de 64.21 y 66.11 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, siendo iguales estadísticamente. Los tratamientos con menor rendimiento de FV fueron el de 60 % de ET, seguido por el riego de gravedad (Figura 6a). En cuanto a las especies evaluadas, la canola y avena fueron estadísticamente superiores a los demás cultivos. El cártamo fue el que obtuvo el menor rendimiento de forraje verde, con una producción de 50.66 t ha<sup>-1</sup> (Figura 6b).



**Figura 6.** Rendimientos de forraje verde en diferente tipo de riego (a) y cultivos de invierno (b). Las barras verticales indican la desviación estándar.

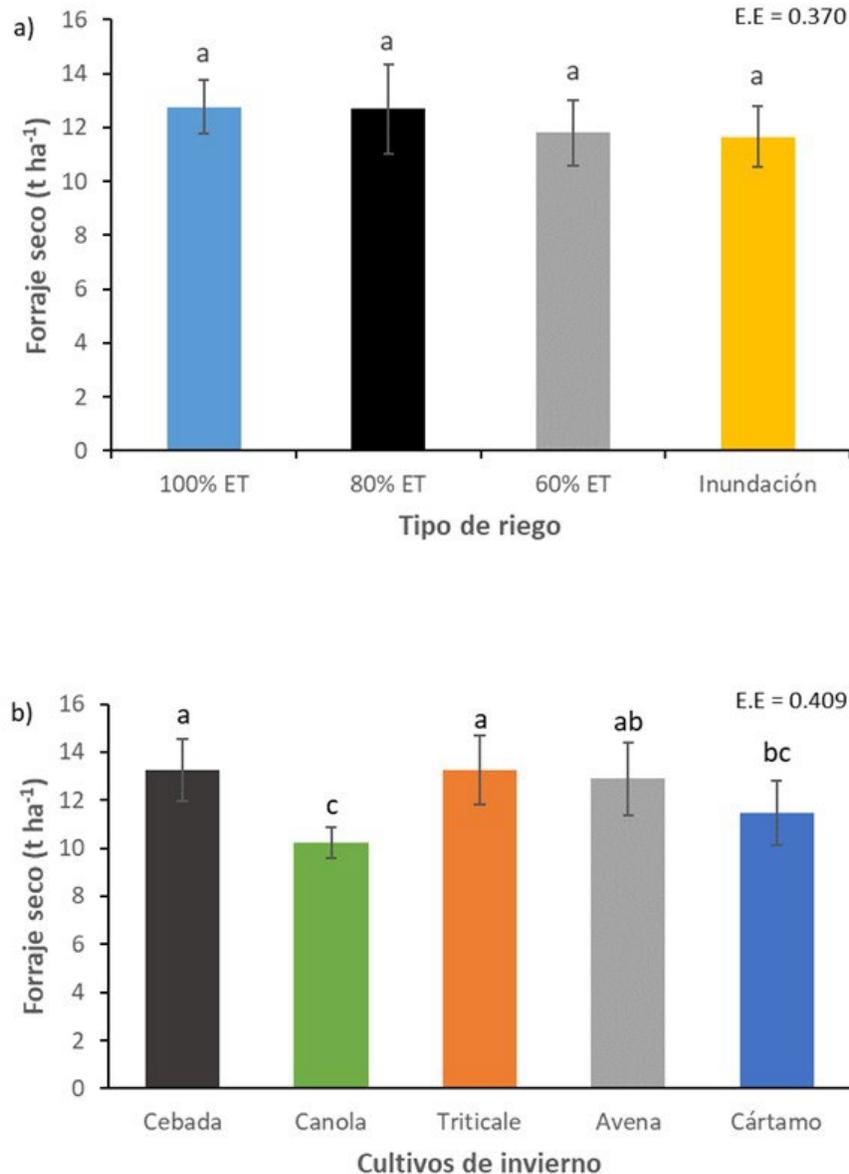
El incremento de la biomasa en los tratamientos de ET se debe a que el agua de riego se aplica de manera eficiente y constante, lo cual

crea condiciones de humedad favorable para el buen desarrollo del cultivo desde etapas tempranas, lo que resulta en una mayor producción de biomasa (Reta-Sánchez, Cueto-Wong, Gaytan-Mascorro, & Santamaria-Cesar, 2007; Sánchez-Hernández *et al.*, 2013), además de que el rendimiento está influenciado por el tipo de cultivar, la fecha de siembra y los rasgos agronómicos de cada una de las especies (Ochoa-Espinoza *et al.*, 2022a). Al respecto, Zavala-Borrego *et al.* (2021) observaron un incremento en el rendimiento de forraje verde en tratamientos donde se aplicó el riego por goteo con base en niveles de ET (80 y 100 %) en comparación con el riego por inundación.

## Forraje seco (FS)

La producción de FS para los tipos de riego no mostró diferencias significativas. Los mayores rendimientos fueron en los tratamientos de 80 y 100 % de ET, con rendimientos de 12.68 y 12.76 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, con respecto a los tratamientos de 60 % de ET y el riego por gravedad (Figura 7a). La producción de FS para los diferentes cultivos de invierno mostró diferencias significativas entre ellos (Figura 7b). Los cultivos que presentaron mayor FS fueron cebada, triticale y avena con 13.26, 13.24 y 12.89 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Lo anterior se relaciona con que estas especies presentan mayor capacidad de amacollamiento y generan mayor índice de área foliar, lo que favorece el incremento de biomasa y, en consecuencia, mayores rendimientos de forraje (Prado *et al.*, 2017). Los rendimientos más bajos se reportaron en las especies de cártamo (11.47 t ha<sup>-1</sup>) y canola (10.25 t ha<sup>-1</sup>), comportamiento asociado con el estrés abiótico presente en la planta, que provoca alteraciones en las funciones fisiológicas (capacidad fotosintética y actividades

metabólicas), que reducen la formación de granos y espigas, lo cual afecta los rendimientos en el forraje (Nurunnaher & Islam, 2017).

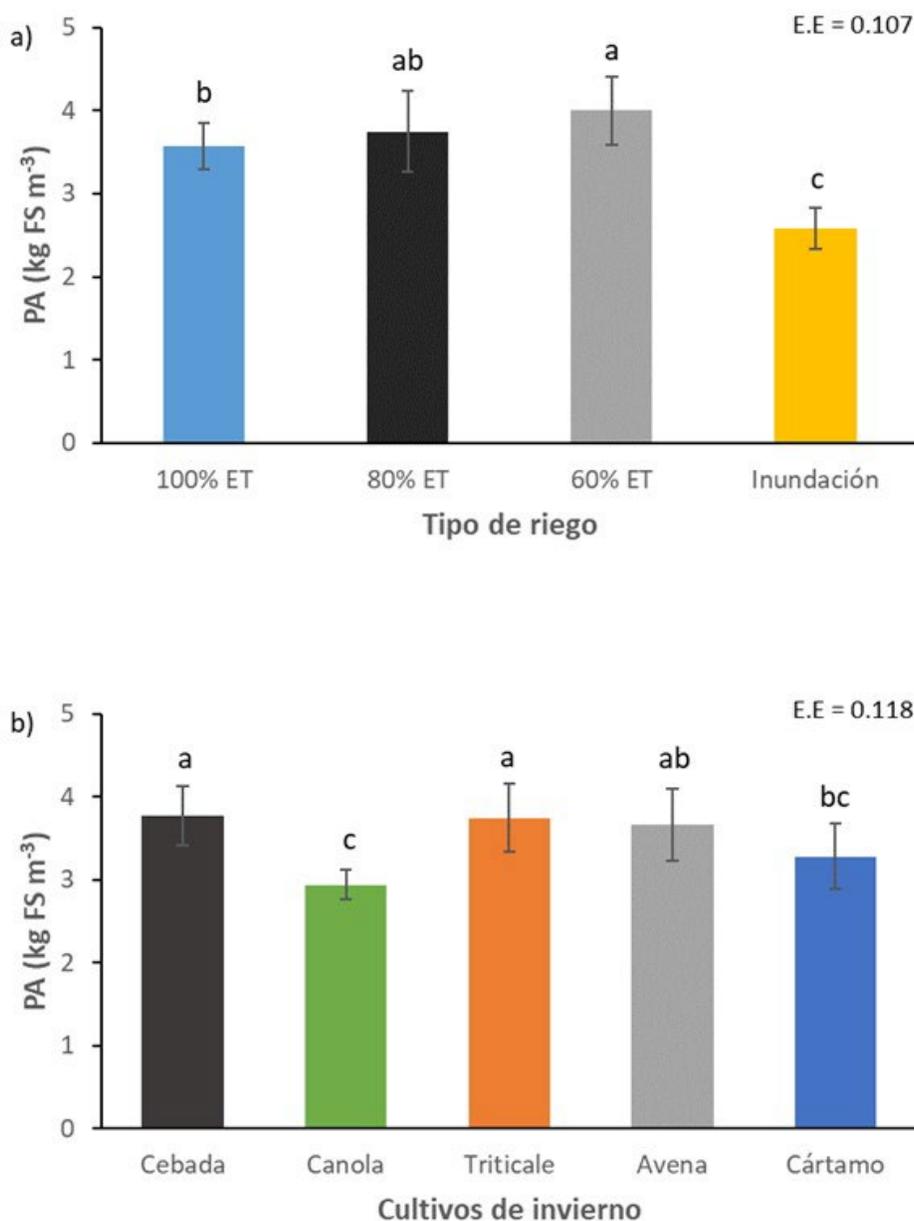


**Figura 7.** Rendimientos de forraje seco en diferente tipo de riego (a) y cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación. Las barras verticales indican la desviación estándar.

López-Jara *et al.* (2022) reportaron mayores rendimientos de materia seca en las especies de cebada y triticale con respecto a la canola y el cártamo durante el ciclo otoño-invierno, que son similares a los resultados de esta investigación. En este mismo sentido, los rendimientos del presente estudio son superiores a los reportados por Ochoa-Espinoza *et al.* (2022a), quienes obtuvieron menores rendimientos de FS en la evaluación del potencial de rendimiento de cinco especies forrajeras (cebada, triticale, avena, trigo y cártamo) en el ciclo de producción otoño-invierno 2017-2018.

### **Productividad del agua (PA)**

La PA mostró diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de riego y las especies cultivadas. La mayor PA se obtuvo en los tratamientos de 60 y 80 % de ET, con valores promedio de 4.00 y 3.75 kg FS m<sup>-3</sup>, que supera al riego por inundación un 35.5 y 31.2 %, respectivamente (Figura 8a). La cebada, avena y triticale obtuvieron los mayores valores de productividad del agua debido a que son especies de menor requerimiento hídrico (Reta *et al.*, 2017), mientras que el menor valor de PA se registró con la canola (Figura 8b).



**Figura 8.** Productividad del agua en diferente tipo de riego (a) y en cultivos de invierno (b). Las barras verticales indican la desviación estándar.

El incremento en la PA en los tratamientos de 60 y 80 % de ET se debe a que se utilizó menor cantidad de agua de riego con relación a los tratamientos de 100 % de ET y riego por inundación; lo anterior se asocia

con el hecho de que la mayor PA se obtiene cuando se emplea menor lámina de agua riego (Zavala-Borrego *et al.*, 2022). Al respecto, Núñez-Ramírez *et al.* (2020) reportaron mayor PA del agua en la evaluación de cuatro diferentes tensiones de humedad en el suelo (10, 20, 30 y 40 kPa) al obtener mejores resultados con valores de humedad más bajos en la producción de seis genotipos de maíz. Los resultados obtenidos en la presente investigación son similares a los reportados por Reyes *et al.* (2023), quienes evaluaron tres niveles de ET (60, 80 y 100 %) y riego por gravedad en maíz forrajero, y reportaron mayor PA en el riego por goteo (60 % de ET) ( $3.60 \text{ kg FS m}^{-3}$ ) y menor en el riego por gravedad ( $2.21 \text{ kg de FS m}^{-3}$ ).

## Conclusiones

En la presente investigación no hubo interacción entre los niveles de los dos factores. Sin embargo, los diferentes niveles de ET afectaron el rendimiento de biomasa y la productividad del agua. Con el 80 y 100 % de ET se obtiene el mayor rendimiento de biomasa (FV y FS) en los cultivos de cebada, triticale y avena. La productividad del agua fue mayor en los tratamientos de 60 y 80 % de ET, mientras que en los cultivos de invierno, la mayor PA correspondió a la cebada, triticale y avena. Se recomienda aplicar el 60 % de ET, pues no existen diferencias en rendimiento (FS) ni en productividad del agua con el 80 % de ET. En general, los resultados indicaron que los tratamientos con riego por goteo con base en diferentes niveles de irrigación de acuerdo con porcentajes de ET y déficit hídrico mantienen el potencial productivo de los cultivos de invierno en la Comarca Lagunera.

## Referencias

- Alghory, A., & Yazar, A. (2019). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. *Irrigation Science*, 37(1), 61-77. DOI: 10.1007/s00271-018-0603-y
- Buthelezi, L. S., Mupangwa, J. F., Muchenje, V., & Nherera, Ch. (2019). Influence of drying technique on chemical composition and ruminal degradability of subtropical *Cajanus cajan* L. *Animal Nutrition*, 5, 95-100. DOI: 10.1016/j.aninu.2018.03.001
- Espinoza, X. M. O., Aguilera-Molina, N. A., Barreras, C. I. C., Gracia, A. B., Casillas, E. Á., Bolivar, E. H. G., & Jiménez, J. N. (2023). Comportamiento de líneas élite y variedades de cártamo del tipo oleico en el sur de Sonora/Performance of elite lines and varieties of carthamus of the oleic type in southern Sonora. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(3), 2998-3007. DOI: 10.34188/bjaerv6n3-081
- Fernández, R.E., & Camacho, F. (2005). Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros. Horticultura Internacional*, (1), 86-89.
- Flores, G. H., Ojeda, B. W., Flores, M. E., Sifuentes, I. E., & Mejía, S. E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea Mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*, 47(3), 347-359.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana* (núm. 6) (pp. 90-93). Ciudad de México, México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Godoy-Ávila, C., Pérez-Gutiérrez, A., Torres, C. A., Hermosillo, L. J., & Reyes, I. (2003). Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. *Agrociencia*, 37(2), 107-115.
- Him-Lo, T., Rudnick, D. R., DeJonge, K. C., Bai, G., Njuky-Nakabuye, H., Katimbo, A., & Heeren, D. M. (2020). Differences in soil water changes and canopy temperature under varying water×nitrogen sufficiency for maize. *Irrigation Science*, 38, 519-534. DOI: 10.1007/s00271-020-00683-2
- López-Jara, A. G., Reta-Sánchez, D. G., Reyes-González, A., Santana, O. I., López-Calderón, M. J., & Sánchez-Duarte, J. I. (2022). Composición nutritiva y productividad de forrajes alternativos de otoño-invierno en diferentes fechas de siembra del norte de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(SPE28), 125-135. DOI: 10.29312/remexca.v13i28.3268
- May-Lara, C., Pérez-Gutiérrez, A., Ruiz-Sánchez, E., Ic-Caamal, A. E., & García-Ramírez, A. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. Y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* (Genn.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 1039-1045. DOI: 10.56369/tsaes.1104
- Nurunnaher, A., & Islam, M. R. (2017). Efectos y manejo del estrés por calor en el trigo. Una revisión. *Agronomía para el Desarrollo Sostenible*, Dev. 5(37), 1-37. DOI: 10.1007/s13593-017-0443-9

- Núñez-Ramírez, F., Escobosa-García, I., Cárdenas-Salazar, V., Santillano-Cázares, J., Ruelas-Islas, J. D. R., Preciado-Rangel, P., & Díaz-Ramírez, J. (2020). Tensión de humedad del suelo, crecimiento, eficiencia en el uso del agua y rendimiento de maíz cultivado en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 805-815. DOI: 10.28940/terra.v38i4.763
- Ochoa-Espinoza, X. M., Reta-Sánchez, D. G., Cano-Ríos, P., Sánchez-Duarte, J. I., Ochoa-Martínez, E., García-Martínez, J. E., & Quiroga-Garza, H. M. (2022a). Rendimiento y valor nutritivo de cereales y cártamo forrajero en la Comarca Lagunera. *Biotecnia*, 24(2), 142-148. DOI: 10.18633/biotecnia.v24i2.1620
- Ochoa-Espinoza, X. M., Reta-Sánchez, D. G., Cano-Ríos, P., Sánchez-Duarte, J. I., Ochoa-Martínez, E., García-Martínez, J. E., & Reyes-González, A. (2022b). Nutritional yield and composition of spiny and spineless varieties of safflower (L.) forage harvested at four phenological stages. *The Open Agriculture Journal*, 16(1), 1-8. DOI: 10.2174/18743315-v16-e2201250
- Prado, S. A., Gallardo, J. M., Kruk, B. C., & Miralles, D. J. (2017). Strategies for yield determination of bread wheat and two-row barley growing under different environments: A comparative study. *Field Crops Research*, 203, 94-105. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.12.013

- Reyes-González, A., Martínez-Rodríguez, J. G., Palomo-Rodríguez, M., Faz-Contreras, R., Cruz-Chaires, J. J., & Sánchez-Duarte, J. I. (2011). Producción de avena forrajera con riego por goteo subsuperficial en la Comarca Lagunera. En: *Memoria de la XXIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED* (pp. 189-195). Gómez Palacio, México: Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Reyes, G. A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Reta, S. D. G., Sánchez, D. J. I., Preciado, R. P., & Fortis, H. M. (2019). Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using the METRIC model and in situ measurements. *Sensors*, 19(8), 1857. DOI: 10.3390/s19081857
- Reyes, G. A., Franco, G. I., Hernández, L. E., & Maltos, B. J. (2020). Evaluación del potencial hídrico, temperatura foliar y rendimiento en sorgo (*sorghum* spp.) forrajero bajo riego por goteo. *Ciencia e Innovación*, 3(1), 83-90.
- Reyes, A. G., Reta, D. G. S., Sánchez, J. I. D., Preciado, P. R., Rodríguez, V. M. M., & Ruiz, O. Á. (2023). Uso del atmómetro y coeficiente de cultivo en la programación del riego en maíz forrajero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), 1-14. e3160. DOI: 10.19136/era.a10n1.3160
- Reta-Sánchez, D. G., Cueto-Wong, J. A., Gaytan-Mascorro, A., & Santamaria-Cesar, J. (2007). Rendimiento y extracción de nitrógeno, fosforo y potasio de maíz forrajero en surcos estrechos. *Agricultura Técnica en México*, 33, 145-151. DOI: 10.35196/rfm.2017.2.227-233

- Reta-Sánchez, D. G., Serrato-Corona, J. S., Quiroga-Garza, H. M., Figueroa-Viramontes, U., & Gaytán-Mascorro, A. (2017). Potencial forrajero de cultivares de canola primaverales e invernales en la Comarca Lagunera, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(2), 227-233.
- Reta, D. G. S., Sánchez, J. I. D., Ochoa, E. M., Reyes, A. G., & Rodríguez, K. H. (2023). Intercepción de radiación solar y rendimiento de forraje de brásicas y cereales de otoño-invierno. *Agrofaz*, 5(1), 3-9.
- Sader, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural-Delegación en la Región Lagunera, Sector Agropecuario. *El Siglo de Torreón*, suplemento especial, 24.
- Sánchez-Hernández, M. A., Aguilar-Martínez, C.U., Valenzuela-Jiménez, N., Joaquín-Torres, B. M., Sánchez-Hernández, C., Jiménez-Rojas, M. C. & Villanueva-Verduzco, C. (2013). Rendimiento en forraje de maíces del trópico húmedo de México en respuesta a densidades de siembra. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4, 271-288.
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap pressure in vascular plants Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 148(3668), 339-346. DOI: 10.1126/science.148.3668.339
- Servin-Palestina, M., Sánchez-Gutiérrez, R. A., Ramírez-Valle, O., Galindo-Reyes, M. A., & Gutiérrez-Bañuelos, H. (2018). Modelos para programación y optimización de agua de riego en avena forrajera. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(4), 667-684. DOI: 10.22319/rmcp.v9i4.4404

- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2021). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. Ciudad de México: México: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- Xu, S., Harrison, J. H., Kezar, W., Entrikin, N., Loney, K. A., Riley, R. E., & Hunt, C. (1995). Evaluation of yield, quality, and plant composition of early-maturing corn hybrids harvested at three stages of maturity. *The Professional Animal Scientist*, 11(3), 157-165. DOI: 10.15232/S1080-7446(15)32580-8
- Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. D. P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Moreno, V. M., & Preciado-Rangel, P. (2021). Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero. *Terra Latinoamericana*, 39(1), 1-14. e954. DOI: 10.28940/terra.v39i0.954
- Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. D. P., Cano-Ríos, P., & Rodríguez-Moreno, V. M. (2022). Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 407-420. DOI: 10.29312/remexca.v13i3.2294

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-08

Artículos

**Evaluación de escenarios en la validación de datos de precipitación del satélite GPM con estaciones meteorológicas para uso en emergencias ambientales**  
**Evaluation of scenarios in the validation of precipitation data from the GPM satellite for use in environmental emergencies by meteorological stations**

Carlos Dueñas-Valcárcel<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1141-6218>

Julio Rojas-Flores<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9284-1452>

Óscar De-la-Cruz-Huerta<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8885-360X>

Carlos Gómez-Karpenko<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3311-6408>

<sup>1</sup>Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Lima, Perú, [cduenas.ing.amb@gmail.com](mailto:cduenas.ing.amb@gmail.com)

<sup>2</sup>Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Lima, Perú, [u201916115@upc.edu.pe](mailto:u201916115@upc.edu.pe)

<sup>3</sup>Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Lima, Perú, [odelacruz@oefa.gob.pe](mailto:odelacruz@oefa.gob.pe)



<sup>4</sup>Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Lima, Perú,  
cgomez@oefa.gob.pe

Autor para correspondencia: Carlos Dueñas-Valcárcel,  
cduenas.ing.amb@gmail.com

## Resumen

Después de una emergencia ambiental relacionada con las lluvias, conocer las precipitaciones ocurridas en la zona de la emergencia en esas horas o día ayuda a determinar si se trató de un evento climático excepcional o regular. Dicha información permite evaluar la responsabilidad de una organización en el contexto de la fiscalización ambiental por parte del gobierno. Este trabajo permitirá obtener de una manera correcta los valores de precipitaciones del satélite GPM (Global Precipitation Measurement), que brinda datos con resolución de 0.1° equivalente a 10 km aproximadamente, y periodicidad de 30 minutos, mediante una plataforma Web Open Access. Con fines educativos en la investigación, se exhiben tres escenarios de descarga de datos del satélite GPM, dos de estos escenarios presentan omisiones que resultan en inexactitudes, mientras que el tercer escenario se ejecuta de manera precisa. Los datos satelitales se procesaron a través del *software* ArcGis con lo que se obtuvo el valor de las precipitaciones y se realizó una correlación lineal para compararlos con los valores de precipitación de las estaciones meteorológicas convencionales del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en las mismas ubicaciones geográficas y en el mismo día, con lo que se logró un valor de correlación de Spearman de 0.4, 0.5 y 0.6 para el primero, segundo y tercer

escenario, respectivamente. Esto indica que el uso de los valores obtenidos del satélite GPM en un día puede ser confiable cuando es descargado de manera precisa y es recomendable su uso cuando se tengan zonas de estudio que están a una distancia mayor de 10 km de una estación meteorológica.

**Palabras clave:** emergencia ambiental, estación meteorológica, satélite GPM, validación de datos.

### Abstract

After an environmental emergency related to rain, knowing the rainfall that occurred in the emergency area in those hours or day helps us determine whether it was an exceptional or regular weather event. This information allows us to evaluate the responsibility of an organization in the context of environmental oversight by the government. This work will allow us to correctly obtain the precipitation values from the GPM (Global Precipitation Measurement) Satellite, which provides data with a resolution of  $0.1^\circ$  equivalent to approximately 10 km, and a periodicity of 30 minutes, through an open access web platform. For educational purposes in the research, three GPM satellite data download scenarios are exhibited, two of these scenarios present omissions that result in inaccuracies, while the third scenario is executed accurately. The satellite data were processed through the ArcGis software, obtaining the value of precipitation and a linear correlation was carried out comparing them with the precipitation values of the conventional SENAMHI meteorological stations in the same geographical locations and on the same day, obtaining a value of Spearman correlation of 0.4, 0.5 and 0.6 for the first, second and third scenarios respectively. This indicates that the use of the

values obtained from the GPM satellite in one day can be reliable when it is downloaded accurately and its use is recommended when there are study areas that are at a distance greater than 10 km from a meteorological station.

**Keywords:** Environmental emergency, weather station, GPM satellite, data validation.

Recibido: 15/07/2024

Aceptado: 28/01/2025

Publicado *ahead of print*: 05/02/2025

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) señala que las consecuencias del cambio climático en los sistemas hídricos incluyen, por una parte, temperaturas más altas, menos precipitaciones y sequías más graves; por la otra, una mayor frecuencia de las lluvias torrenciales y de los episodios de inundaciones. Precisamente estos extremos hacen que la planificación y creación de infraestructura resulten tan complicadas. Por lo tanto, la infraestructura física hídrica —como la provisión de agua y de servicios de saneamiento o tratamiento— puede sufrir daños, lo cual puede provocar efectos adversos en el medio ambiente o la salud de las personas (UNESCO, 2020).

La Red Interagencial para la Educación en Situaciones de Emergencia (INEE, 2019) señala que una emergencia ambiental se puede definir como un desastre o accidente repentino causado por factores naturales, tecnológicos o inducidos por el ser humano, o una combinación de estos, que provocan o amenazan con provocar graves daños al ambiente, así como afectaciones a la salud humana y/o a los medios de subsistencia. Esto incluye emergencias causadas por agua y viento, como precipitaciones extremas e inundaciones, ciclones tropicales, vendavales, erosiones costeras, tsunamis, rotura de presas, sequías, escasez de agua, tormentas de granizo, tormentas de arena, relámpagos.

En tal contexto, Mardones, Echeverría y Jara (2004) refieren a una emergencia ambiental en la ciudad de Concepción, que se debió a un solo evento pluviométrico continuo con intensidad de 158 mm en 20 h, que dejó un total de 5224 damnificados, 36 casas destruidas y cinco personas muertas; se constató que umbrales de precipitación superiores a 150 mm en 24 h son capaces de detonar catástrofes con efectos graves.

Por ello, conocer la cantidad de lluvia en una región específica ayuda a determinar si fue excepcional o no al compararla con registros históricos. Además, permite identificar si estas precipitaciones tuvieron un impacto significativo en situaciones de emergencia ambiental. Por lo tanto, esta información resulta valiosa para las labores de supervisión y fiscalización ambiental.

Asimismo, contar con estaciones meteorológicas representa un gran aporte a la fiscalización ambiental para advertir si ocurrieron precipitaciones inusuales relacionadas con una emergencia ambiental.

Sin embargo, Basualdo (2015) menciona que por diversas razones que están vinculadas con la ubicación geográfica de éstas, es

recomendable que para contar con una red de estaciones para medir precipitaciones se encuentren separadas por 10 km; a diferencia del parámetro de presión, que puede contar con una separación de 100 km. Asimismo, Euscátegui, Vanegas y Ávila (2022) señalaron que la medida de precipitación de una estación meteorológica debe interpretarse en un radio de unos 10 kilómetros alrededor del metro cuadrado en donde se lleva a cabo la medición.

En el Perú se cuenta con las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Según Dávila *et al.* (2021), se tienen 551 estaciones meteorológicas que obtienen datos de precipitación entre estaciones meteorológicas convencionales y automáticas al año 2021. Asimismo, tal y como se puede apreciar del mapa interactivo del SENAMHI (2024) en la Figura 1, se verifican extensas áreas del territorio nacional que están distantes de las estaciones meteorológicas y supera en gran medida el valor de los 10 km de distancia y/o radio recomendado en el párrafo anterior.

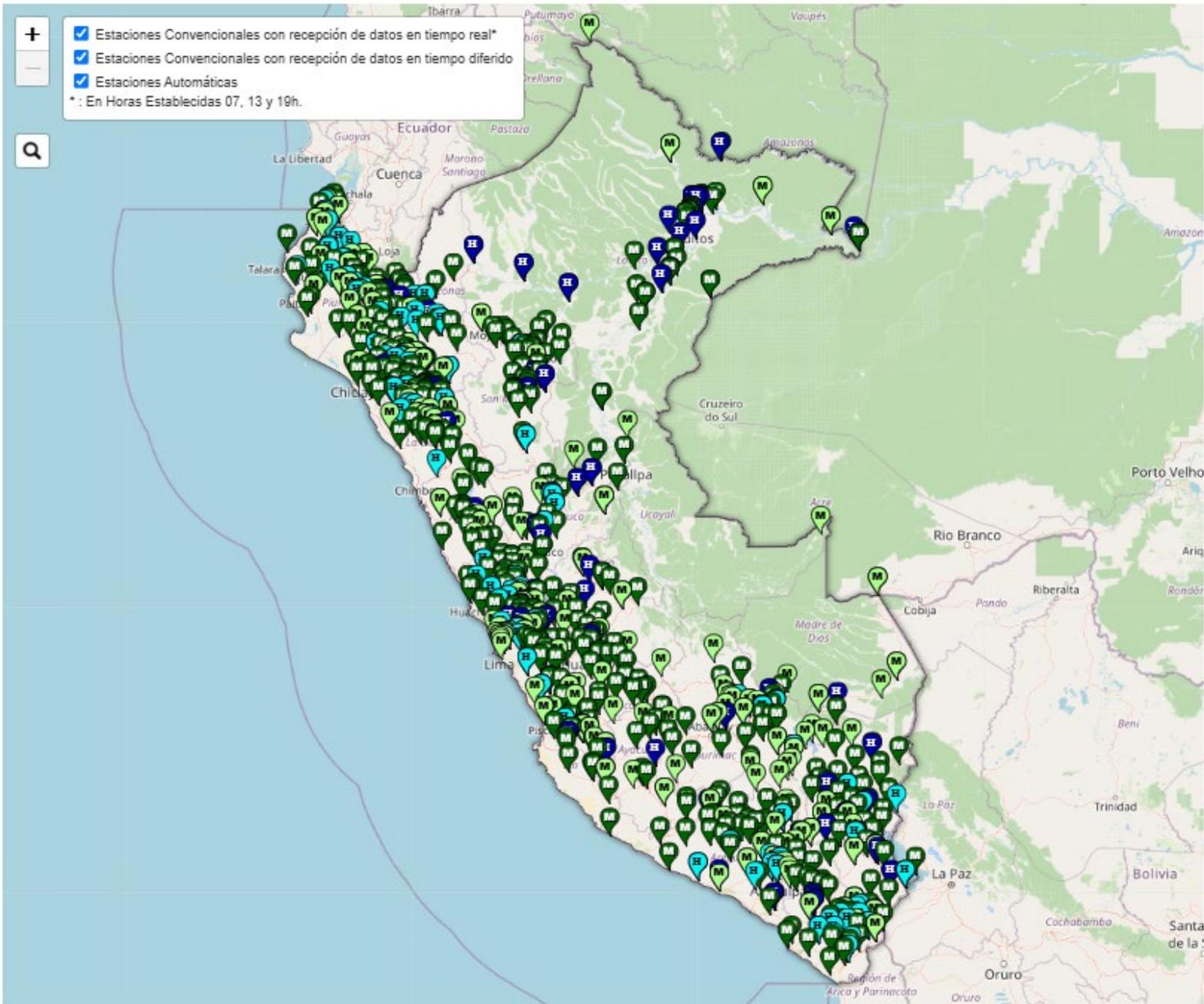


Figura 1. Estaciones del SENAMHI.

Wang *et al.* (2023) destacan que las precipitaciones con altas resoluciones espaciales y temporales son cruciales en el monitoreo hidrológico, la alerta de desastres y el pronóstico meteorológico; sin embargo, representa todo un desafío en aquellas regiones con terrenos complejos. Por tal motivo, plantean un modelo utilizando una red neuronal que incluye variables ambientales, como vegetación, temperatura de superficie terrestre, evapotranspiración, un modelo de evaluación digital, pendiente, latitud y longitud. Como resultado se destaca que los valores menores a  $0.1^\circ$  ( $\sim 10$  km) permiten obtener una mayor precisión de los valores de precipitación.

Rojas, Minder, Campbell, Massmann y Garreaud (2021) resaltan la importancia de los datos satelitales, los cuales permiten obtener información crucial para aquellos lugares que carecen de observaciones de precipitación, incluidas las regiones montañosas con topografía compleja o países en desarrollo. Por tal motivo, plantea el empleo del Global Precipitation Measurement (GPM) para la estimación cuantitativa de precipitación y lo contrasta con campañas de observaciones terrestres, con resultados que orientan las mejores de las estimaciones cuantitativas basadas en satélites.

A nivel internacional, la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de los Estados Unidos (NASA), en la búsqueda constante por comprender y monitorear los patrones climáticos, ha desarrollado herramientas avanzadas para analizar datos de satélites. Una de estas herramientas es GIOVANNI (Geospatial Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure), una plataforma web que permite visualizar, analizar y tener acceso a grandes cantidades de datos de teledetección de la Tierra de libre disponibilidad, a la que se ingresa mediante la siguiente dirección electrónica: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

Dentro de la información satelital que se encuentra de libre disponibilidad en la plataforma GIOVANNI están los datos de los satélites de la misión GPM.

La misión GPM fue construida por la NASA y la JAXA, la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón. El lanzamiento del satélite tuvo lugar el 27 de febrero de 2014 desde el Centro Espacial Tanegashima, en Japón. (León, 2014).

La NASA (2024) señala que la misión GPM es una red internacional de satélites que proporciona observaciones globales de lluvia y nieve de última generación. Se centra en el despliegue de un satélite "Observatorio Central", que lleva un sistema avanzado de radar/radiómetro para medir las precipitaciones desde el espacio y servir como estándar de referencia para unificar las mediciones de precipitaciones, a fin de mejorar el pronóstico de eventos extremos que causan peligros y desastres naturales, y ampliar las capacidades actuales en el uso de información precisa y oportuna sobre las precipitaciones para beneficiar directamente a la sociedad.

En ese sentido, la presente investigación permite obtener de manera precisa los datos de un día u horas de precipitación mediante el Satélite GPM a partir de la plataforma GIOVANNI y su respectivo procesamiento en el *software* ArcGis, sin cometer desaciertos por las horas de diferencias del horario UTC y la hora peruana, así como identificar si las estaciones meteorológicas son convencionales (medición manual en una hora específica) o automáticas. La información del satélite GPM proporciona información con una resolución de 0.1°, equivalente a unos 10 kilómetros, y se actualiza cada 30 minutos. Por otro lado, se pondrá a prueba la correlación que existe entre los valores de

precipitación de las estaciones meteorológicas con los valores de precipitación extraídos del satélite GPM en un día u hora en específico.

Esta investigación no se centra en valores de periodos de tiempo extensos como meses o años, dado que está enfocada a la fiscalización ambiental relacionada con la posocurrencia de una emergencia ambiental que podría haber sido ocasionada por precipitaciones extremas que se dieron en unas cuantas horas o, en algunos casos, en un día.

Asimismo, el hecho de que la evaluación se realice en un periodo corto de un día exige una mayor similitud entre los valores de precipitación obtenidos del satélite GPM con los obtenidos de las estaciones meteorológicas debido a que se espera que la correlación sea más alta en periodos de tiempo más largos, como un mes o años, en comparación con periodos de tiempo más cortos; esto se debe a que los datos de precipitación pueden ser muy variables en escalas de tiempo cortas como un día debido a la naturaleza aleatoria e impredecible de los eventos de precipitación.

## Materiales y métodos

Se seleccionaron 39 estaciones meteorológicas convencionales del SENAEMI de manera que cubra todo el territorio del Perú. Se recopilaron sus coordenadas geográficas y se ubicaron en un formato *shape* utilizando ArcGis. De estas 39 estaciones se recogieron los datos de precipitación para el 22 de enero de 2024, una fecha seleccionada de manera aleatoria para compararla con las imágenes satelitales del GPM.

Luego se accedió a la plataforma GIOVANNI de la NASA para descargar las imágenes satelitales en formato GEOTIFF del satélite GPM,

específicamente la opción “Estimación de precipitación multisatélite con calibración de medidores climatológicos-Ejecución tardía-GPM\_3IMERGHHL v06 (Huffman, Bolvin, Nelkin, & Tan, 2020), para el mismo día, 22 de enero de 2024.

Es importante señalar que la hora en la plataforma Giovanni del Satélite GPM se mide en horas UTC y para Perú esto es UTC-5 (24timezones, 2024), como se muestra en la Tabla 1. Por lo tanto, en este estudio se compararon tres escenarios de la información de precipitación obtenida de la plataforma GIOVANNI con los datos de precipitaciones de las estaciones meteorológicas.

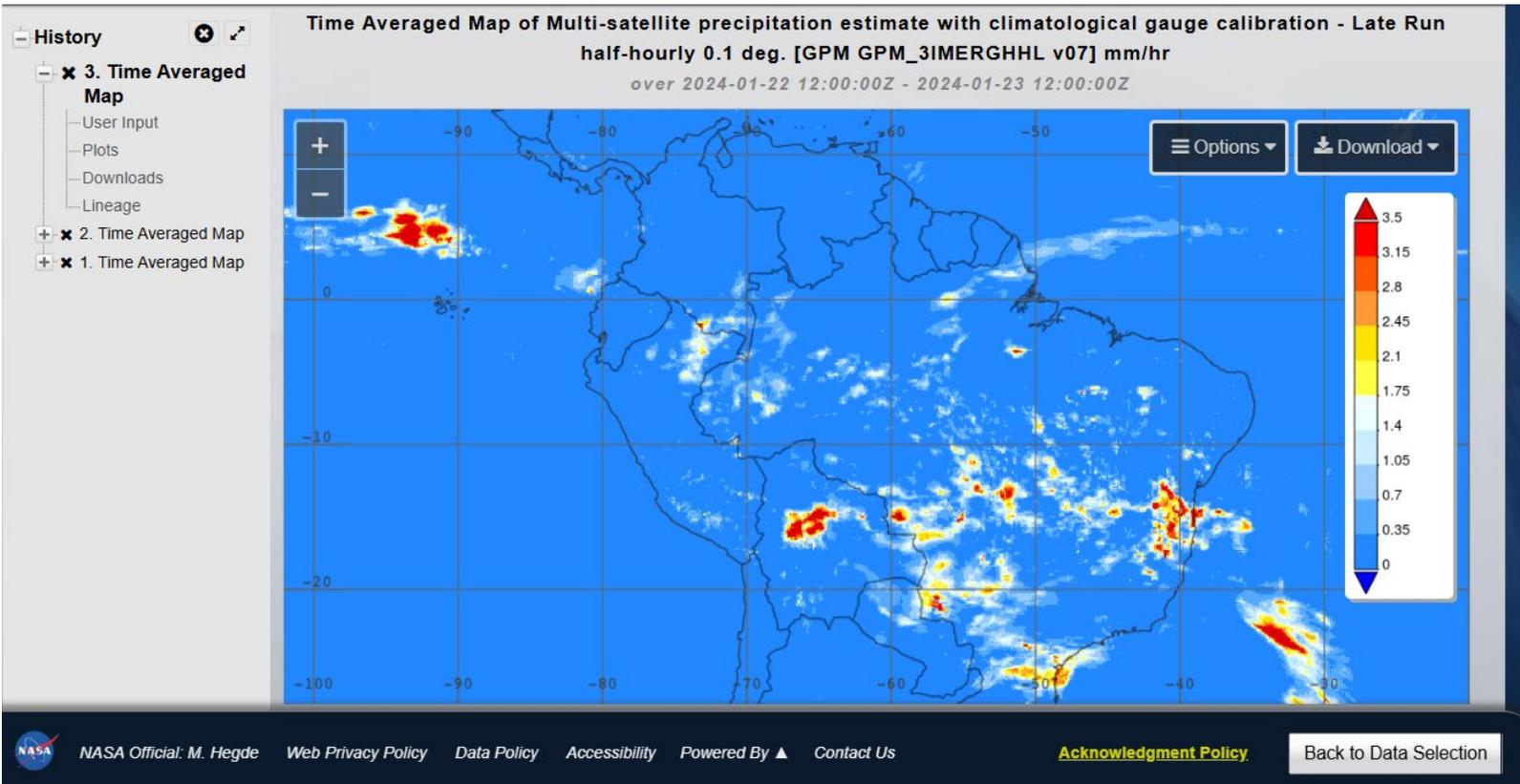
**Tabla 1.** Comparación de hora UTC y hora en el Perú para el día 22-01-2024.

Hora UTC	Hora en Perú (UTC-5)	Hora UTC	Hora en Perú (UTC-5)	Hora UTC	Hora en Perú (UTC-5)
00:00 del día 22-01-2024	19:00 del día 21-01-2024	10:00 del día 22-01-2024	05:00 del día 22-01-2024	20:00 del día 22-01-2024	15:00 del día 22-01-2024
01:00 del día 22-01-2024	20:00 del día 21-01-2024	11:00 del día 22-01-2024	06:00 del día 22-01-2024	21:00 del día 22-01-2024	16:00 del día 22-01-2024
02:00 del día 22-01-2024	21:00 del día 21-01-2024	12:00 del día 22-01-2024	07:00 del día 22-01-2024	22:00 del día 22-01-2024	17:00 del día 22-01-2024
03:00 del día 22-01-2024	22:00 del día 21-01-2024	13:00 del día 22-01-2024	08:00 del día 22-01-2024	23:00 del día 22-01-2024	18:00 del día 22-01-2024
04:00 del día 22-01-2024	23:00 del día 21-01-2024	14:00 del día 22-01-2024	09:00 del día 22-01-2024	00:00 del día 23-01-2024	19:00 del día 22-01-2024
05:00 del día 22-01-2024	00:00 del día 22-01-2024	15:00 del día 22-01-2024	10:00 del día 22-01-2024	01:00 del día 23-01-2024	20:00 del día 22-01-2024
06:00 del día 22-01-2024	01:00 del día 22-01-2024	16:00 del día 22-01-2024	11:00 del día 22-01-2024	02:00 del día 23-01-2024	21:00 del día 22-01-2024
07:00 del día 22-01-2024	02:00 del día 22-01-2024	17:00 del día 22-01-2024	12:00 del día 22-01-2024	03:00 del día 23-01-2024	22:00 del día 22-01-2024
08:00 del día 22-01-2024	03:00 del día 22-01-2024	18:00 del día 22-01-2024	13:00 del día 22-01-2024	04:00 del día 23-01-2024	23:00 del día 22-01-2024
09:00 del día 22-01-2024	04:00 del día 22-01-2024	19:00 del día 22-01-2024	14:00 del día 22-01-2024	05:00 del día 23-01-2024	00:00 del día 23-01-2024

El primer escenario implica una descarga inexacta de los datos de la plataforma GIOVANNI, ya que no se consideró la diferencia horaria entre UTC y Perú. Para el 22-01-2024 en Perú se consideró desde la hora UTC 00:00 del 22-01-2024 hasta la hora UTC 00:00 del 23-01-2024.

El segundo escenario implica una descarga de los datos de la plataforma Giovanni teniendo en cuenta la diferencia horaria entre UTC y Perú. Para el 22-01-2024 en Perú se consideró desde la hora UTC 05:00 del 22-01-2024 hasta la hora UTC 05:00 del 23-01-2024. Sin embargo, no se tuvo en cuenta que en las estaciones meteorológicas convencionales del SENAMHI la precipitación acumulada diaria de un día es la cantidad total registrada entre las 7 a. m. de ese día y las 7 a. m. del día siguiente (SENAMHI, 2020).

El tercer escenario implica una descarga adecuada de los datos de la plataforma GIOVANNI y se toman en cuenta las dos consideraciones ya mencionadas (diferencia de horario UTC y las horas para considerar un día en las estaciones meteorológicas convencionales). Para el 22-01-2024 en Perú, se consideró desde la hora UTC 12:00 del 22-01-2024 hasta la hora UTC 12:00 del 23-01-2024. El entorno de la plataforma GIOVANNI se aprecia en la Figura 2.



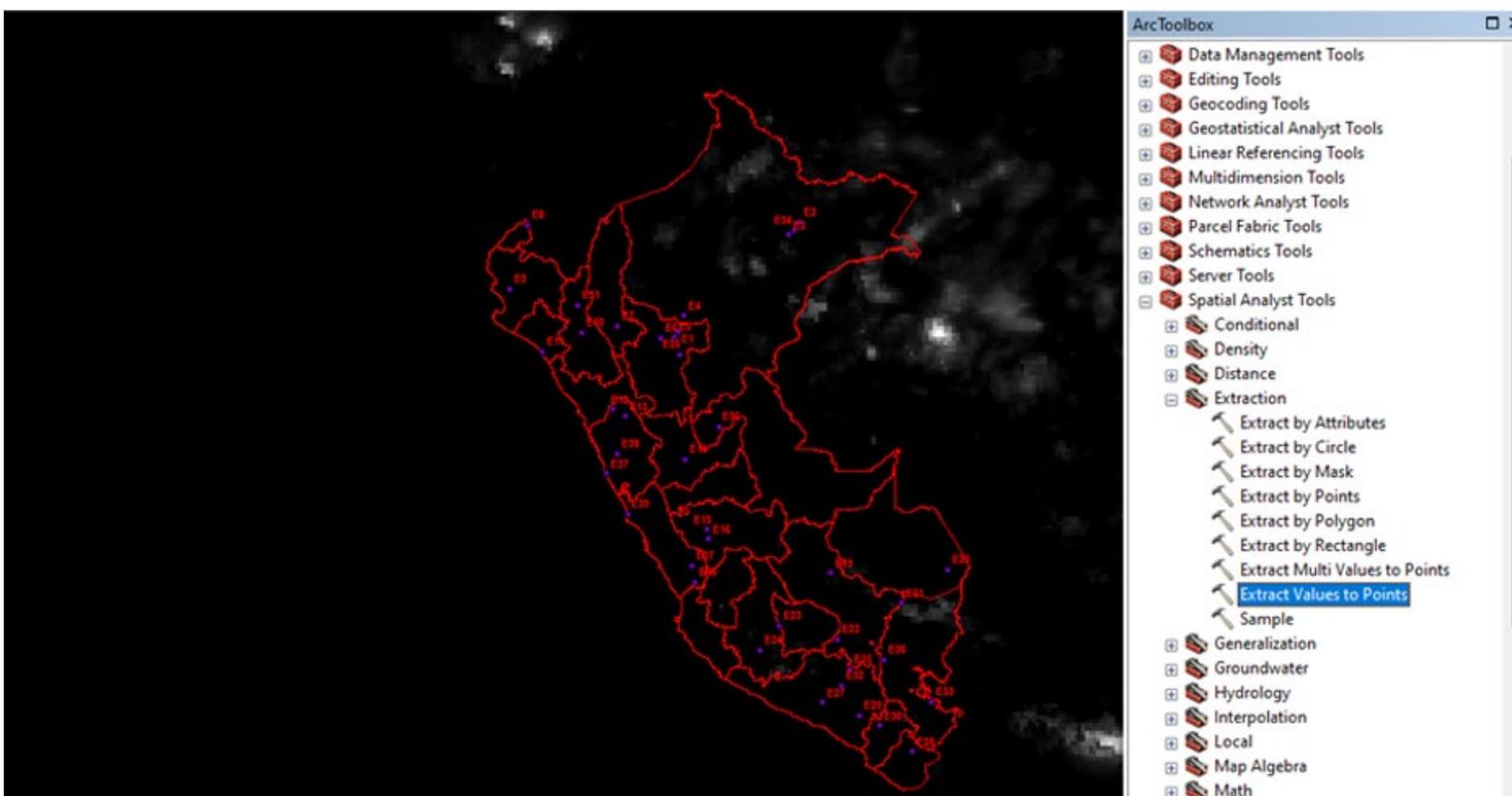
**Figura 2.** Entorno de la plataforma Giovanni.

La explicación de los tres escenarios se presenta la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resumen de consideraciones en cada escenario.

Escenarios	Consideraciones para la descarga de datos del satélite GPM en la plataforma GIOVANNI
Primer escenario	Se consideró para la hora del Perú la misma hora UTC
Segundo escenario	Se consideró para la hora del Perú la hora UTC-5
Tercer escenario	Se consideró para la hora del Perú la hora UTC-5 Se consideró que en las estaciones meteorológicas convencionales del SENAMHI la precipitación acumulada diaria de un día es la cantidad total registrada entre las 7 a. m. de ese día y las 7 a. m. del día siguiente

A continuación se procesaron las imágenes satelitales GPM en formato Geotiff, descargada en cada uno de los tres escenarios con un Shapefile de puntos que contienen las coordenadas geográficas de las 39 estaciones meteorológicas (Figura 3) mediante la herramienta "Extract Values to points", con lo que se obtuvo la información de precipitación del satélite GPM para las estaciones en cada uno de los escenarios. Finalmente, una vez obtenida la información de precipitaciones de las estaciones meteorológicas convencionales del SENAMHI y de los tres escenarios del satélite GPM, se realizó la comparación utilizando una correlación lineal de Spearman a través del *software* IBM SPSS Statistics.



**Figura 3.** Obtención de la precipitación del satélite GPM en las 39 estaciones para los tres escenarios.

Para hacer la correlación entre los valores de precipitaciones obtenidos por las estaciones meteorológicas con los valores de las precipitaciones obtenidas del satélite GPM es primordial verificar si los datos presentan una distribución normal o no normal aplicando Shapiro-Wilk (dado que los datos provienen de 39 estaciones, es decir, menor de 50 datos), para escoger el estadístico adecuado, que puede ser Pearson (para una distribución normal) o Spearman (para una distribución no normal). Tales análisis serán desarrollados con el *software* IBM SPSS Statistics.

Asimismo, es importante mencionar que tal y como se observa en la Figura 3, en esta investigación se ha optado por escoger las estaciones de manera aleatoria; sin embargo, se trató de tener un alcance geográfico homogéneo en todo el territorio peruano, es decir, contar con datos en costa, sierra y selva; al tener estaciones en la costa, que tiene una característica de desierto, existirán zonas en donde se suelen obtener valores de 0 mm/día o muy cercanos al 0 por ausencia de precipitación en casi todo el año.

## Resultados

Se obtuvieron las coordenadas geográficas de las 39 estaciones meteorológicas convencionales del SENAMHI. En la Tabla 3 se muestra la precipitación en mm/día para cada una de ellas obtenidas del SENAMHI.

**Tabla 3.** Coordenadas geográficas y nivel de precipitación de las 39 estaciones.

Núm.	Estación meteorológica	Latitud	Longitud	Precipitación (mm/día)
E1	Pongo de Caynarachi	6° 19' 49.700" S	76° 16' 54.300" W	0
E2	Mazan	3° 29' 17.400" S	73° 4' 54.600" W	52.3
E3	Puerto Almendra	3° 49' 42.980" S	73° 22' 37.360" W	86.4
E4	San Ramon	5° 56' 8.130" S	76° 7' 5.270" W	7.2
E5	Tarapoto	6° 28' 33.500" S	76° 22' 13.400" W	0
E6	Alao	6° 31' 1.200" S	76° 44' 17.000" W	0
E7	Chachapoyas	6° 12' 29.880" S	77° 52' 1.620" W	14.4
E8	Papayal	3° 34' 2.360" S	80° 13' 59.650" W	0
E9	San Miguel	5° 14' 46.330" S	80° 41' 3.690" W	0
E10	Cutervo	6° 22' 46.700" S	78° 48' 18.440" W	2.3
E11	Reque	6° 53' 10.070" S	79° 50' 7.800" W	0
E12	Cabana	8° 23' 26.070" S	78° 0' 16.600" W	9.5
E13	Sihuas	8° 34' 0.000" S	77° 39' 0.000" W	3
E14	Carpish	9° 42' 20.400" S	76° 5' 39.300" W	7.2
E15	Ricran	11° 32' 24.050" S	75° 31' 38.290" W	0.7
E16	Jauja	11° 47' 11.870" S	75° 29' 12.730" W	5.2
E17	Yauyos	12° 29' 30.220" S	75° 54' 37.410" W	2.7
E18	Huangascar	12° 53' 54.880" S	75° 50' 1.140" W	2.2
E19	Quebrada de Yanatile	12° 40' 43.820" S	72° 16' 42.550" W	0.2
E20	Puerto Maldonado	12° 35' 14.280" S	69° 12' 31.850" W	0
E21	San Gabán	13° 27' 39.140" S	70° 24' 35.950" W	10.8
E22	Santo Tomás	14° 23' 55.610" S	72° 5' 15.860" W	8.3

Núm.	Estación meteorológica	Latitud	Longitud	Precipitación (mm/día)
E23	Paucaray	14° 2' 38.030" S	73° 38' 19.030" W	5.6
E24	Puquio	14° 41' 57.390" S	74° 7' 53.750" W	1.6
E25	Caylloma	15° 11' 19.780" S	71° 46' 12.690" W	24.5
E26	Llally	14° 57' 10.300" S	70° 52' 49.900" W	2
E27	Aplao	16° 4' 22.360" S	72° 29' 32.130" W	0
E28	Susapaya	17° 20' 51.800" S	70° 8' 5.000" W	0.8
E29	La Pampilla	16° 24' 49.660" S	71° 32' 4.310" W	0
E30	Omate	16° 40' 31.100" S	70° 58' 45.300" W	0.3
E31	La Cascarilla	5° 40' 18.300" S	78° 53' 51.600" W	13.6
E32	Cabanaconde	15° 37' 21.340" S	71° 58' 26.710" W	23.6
E33	Ilave	16° 3' 35.800" S	69° 38' 25.400" W	1
E34	Punchana	3° 41' 25.070" S	73° 15' 20.130" W	58.3
E35	Tingo de Ponaza	6° 56' 14.000" S	76° 15' 9.600" W	0
E36	San Alejandro	8° 50' 4.000" S	75° 12' 59.010" W	0
E37	Huarmey	10° 4' 5.230" S	78° 9' 44.350" W	0.01
E38	Pariacoto	9° 33' 8.610" S	77° 53' 15.410" W	0
E39	UNJF Sánchez Carrión	11° 7' 25.900" S	77° 36' 21.700" W	0

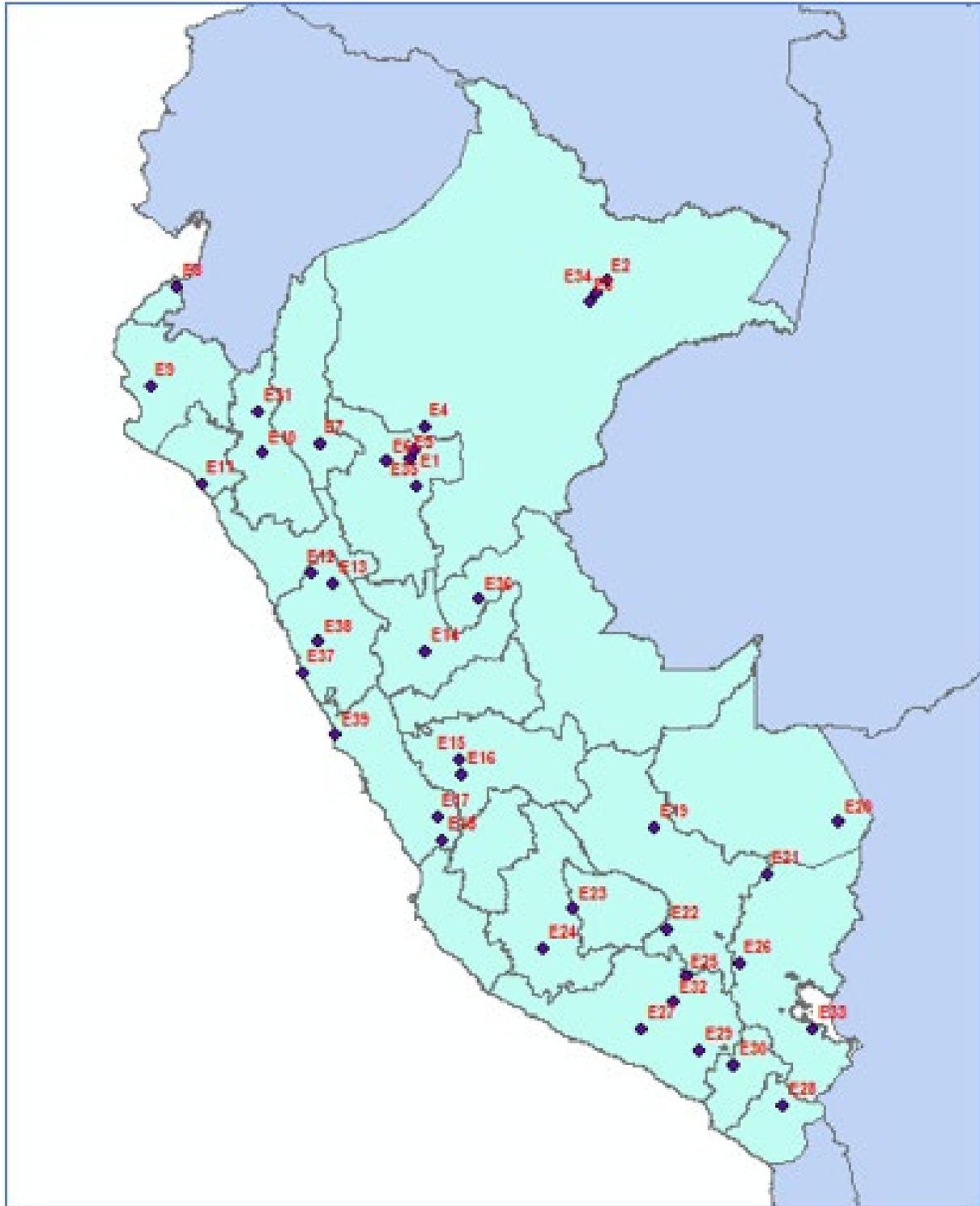
Por lo tanto, corresponde realizar la prueba de normalidad a los resultados de las precipitaciones obtenidas de las estaciones meteorológicas mediante el *software* IBM SPSS Statistics, en los que se obtiene un  $p$  valor o significancia (Sig.) menor que 0.05; por lo tanto, los datos son no normales de acuerdo con Shapiro-Wilk (Tabla 4).

**Tabla 4.** Prueba de normalidad a los valores de precipitación de las estaciones meteorológicas.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
SENAMHI	0.314	39	< 0.001	0.540	39	< <b>0.001</b>

<sup>a</sup>Corrección de significación de Lilliefors.

Después, con las coordenadas geográficas de las 39 estaciones, se elaboró un *shapefile* de puntos en el programa ArcGis, tal cual se observa en la Figura 4.



**Figura 4.** *Shapefile* de puntos que contienen las coordenadas de las 39 estaciones.

En la Tabla 5 se presentan los valores de precipitación obtenidos del satélite GPM para cada uno de los tres escenarios; asimismo, se consignan los valores de precipitación del SENAMHI para las 39 estaciones.

**Tabla 5.** Precipitación de las 39 estaciones con datos del SENAMHI y del satélite GPM.

Núm.	Precipitación SENAMHI (mm/día)	1er escenario		2do escenario		3er escenario	
		(mm/h) satélite GPM	(mm/día) satélite GPM	(mm/h) satélite GPM	(mm/día) satélite GPM	(mm/h) satélite GPM	(mm/día) satélite GPM
E1	0	0.00039	0.00936	0	0	0	0
E2	52.3	0.40098	9.62352	3.0765	73.836	3.52418	84.58032
E3	86.4	0.187623	4.502952	1.27531	30.60744	1.71204	41.08896
E4	7.2	0	0	0	0	0.002657	0.063768
E5	0	0.000089	0.002136	0	0	0	0
E6	0	0.001527	0.036648	0	0	0	0
E7	14.4	0.053345	1.28028	0.053315	1.27956	0.053315	1.27956
E8	0	0.000838	0.020112	0	0	0.000779	0.018696
E9	0	0	0	0	0	0	0
E10	2.3	0	0	0	0	0	0
E11	0	0	0	0	0	0	0
E12	9.5	0.000503	0.012072	0	0	0	0
E13	3	0.000663	0.015912	0	0	0	0
E14	7.2	0.000351	0.008424	0.00027	0.00648	0.00027	0.00648
E15	0.7	0.000011	0.000264	0	0	0	0
E16	5.2	0.001061	0.025464	0.000899	0.021576	0.000899	0.021576
E17	2.7	0.144166	3.459984	0.158226	3.797424	0.142465	3.41916

Núm.	Precipitación SENAMHI (mm/día)	1er escenario		2do escenario		3er escenario	
		(mm/h) satélite GPM	(mm/día) satélite GPM	(mm/h) satélite GPM	(mm/día) satélite GPM	(mm/h) satélite GPM	(mm/día) satélite GPM
E18	2.2	0.061357	1.472568	0.031344	0.752256	0.038671	0.928104
E19	0.2	0.172653	4.143672	0.168197	4.036728	0.071378	1.713072
E20	0	0	0	0	0	0	0
E21	10.8	0.858868	20.61283	0.741801	17.80322	0.662251	15.89402
E22	8.3	0.312309	7.495416	0.087409	2.097816	0.303132	7.275168
E23	5.6	0.044412	1.065888	0.049566	1.189584	0.04964	1.19136
E24	1.6	0.170628	4.095072	0.241929	5.806296	0.234967	5.639208
E25	24.5	0.184818	4.435632	0.37254	8.94096	0.470577	11.29385
E26	2	0.001206	0.028944	0.005416	0.129984	0.0053	0.1272
E27	0	0.001248	0.029952	0.014746	0.353904	0.020966	0.503184
E28	0.8	0.155801	3.739224	0.149058	3.577392	0.144501	3.468024
E29	0	0.0089	0.2136	0.00218	0.05232	0.00218	0.05232
E30	0.3	0.092612	2.222688	0.093338	2.240112	0.084044	2.017056
E31	13.6	0	0	0	0	0	0
E32	23.6	0.057129	1.371096	0.219053	5.257272	0.273532	6.564768
E33	1	0.00585	0.1404	0.060754	1.458096	0.06772	1.62528
E34	58.3	0.302756	7.266144	2.23625	53.67	2.54826	61.15824
E35	0	0.008275	0.1986	0.00823	0.19752	0.00823	0.19752
E36	0	0.010875	0.261	0	0	0	0
E37	0.01	0.025804	0.619296	0.02494	0.59856	0.023959	0.575016
E38	0	0.004703	0.112872	0.002034	0.048816	0.000496	0.011904
E39	0	0.005023	0.120552	0.004745	0.11388	0.004745	0.11388

A continuación se muestra la evaluación si los datos obtenidos de las precipitaciones a través del satélite GPM presentan una distribución normal o no; se procedió a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y se obtuvo que en los tres supuestos presentan una distribución no normal debido a que el  $p$  valor en los tres casos o significancia (Sig.) es menor a 0.05 (Tabla 6).

**Tabla 6.** Prueba de normalidad a los valores de precipitación de las estaciones meteorológicas.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
primersup	0.303	39	< 0.001	0.574	39	< 0.001
segundosup	0.366	39	< 0.001	0.424	39	< 0.001
tercersup	0.362	39	< 0.001	0.421	39	< 0.001

<sup>a</sup>Corrección de significación de Lilliefors.

Teniendo como precedente que los valores tienen una distribución no normal se aplicó la correlación de Spearman; se obtuvieron los valores 0.4, 0.5 y 0.6 para cada uno de los tres escenarios en comparación con los datos del SENAEMI, tal cual se puede apreciar en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Correlación de Spearman de los resultados de precipitación de los tres escenarios comparados con los datos de precipitación del SENAMHI.

Estadísticos		Primer escenario	Segundo escenario	Tercer escenario
SENAMHI	Correlación de Spearman	0.4 <sup>1</sup>	0.5 <sup>2</sup>	0.6 <sup>3</sup>
	Sig. (bilateral)	0.007	< 0.001	< 0.001
	N	39	39	39

<sup>1</sup>La correlación no es significativa en los niveles 0.01 y 0.05 (bilateral).

<sup>2</sup>La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

<sup>3</sup>La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

## Discusión

Con base en las investigaciones realizadas por Basualdo (2015), Euscátegui *et al.* (2022), Wang *et al.* (2023) y Rojas *et al.* (2021), los valores de precipitación de las estaciones meteorológicas se pueden aplicar en un rango de 10 km; sin embargo, a distancias mayores de 10 km no se sugiere debido a diversas razones relacionadas con la ubicación geográfica, en las que influyen la humedad, temperatura, presión atmosférica, topografía y corrientes oceánicas, entre otros factores. Además, en estas investigaciones se ha demostrado que la medida de precipitación de una estación meteorológica debe interpretarse en un radio de unos 10 kilómetros alrededor del metro cuadrado en donde se realiza la medición.

Es decir, se cuenta con investigaciones que permiten concluir que el valor de la estación meteorológica no es confiable al evaluar un área

de estudio que supera los 10 km de la estación meteorológica de referencia. Por esta razón, el uso del satélite GPM serviría para superar tales limitaciones.

Para el primer escenario se obtuvo el menor valor de correlación de Spearman de 0.4 y no significativa para el  $p$  valor a niveles 0.01 y 0.05. No se consideraron para la descarga de los datos del satélite GPM la diferencia de horario UTC (Perú es UTC-5) ni el tipo de estaciones meteorológicas en la comparación (para las estaciones meteorológicas del SENAMHI del Perú, el día se mide de 7 a.m. a 7 a.m. del día siguiente). Es decir, la diferencia de los datos del satélite GPM y de las estaciones meteorológicas convencionales era de 12 horas.

En el segundo escenario se obtuvo un valor de correlación moderada de Spearman de 0.5; sin embargo, no se consideró que se utilizaba los datos de una estación meteorológica convencional del SENAMHI del Perú. Es decir, la diferencia de los datos del satélite GPM y de las estaciones meteorológicas convencionales era de siete horas.

En el tercer escenario se obtuvo el mayor valor de correlación de Spearman, esto es, 0.6, lo cual representa una correlación positiva de moderada a alta entre los valores de precipitación y los datos de precipitación del SENAMHI, al considerar para la descarga de los datos la diferencia de horario UTC y el tipo de estaciones meteorológicas en la comparación. Por lo tanto, en el tercer escenario la diferencia de los datos del satélite GPM y de las estaciones meteorológicas convencionales fue de cero horas.

De la presente exploración inicial entre la validación de valores de precipitación de datos de satélites versus estaciones meteorológicas evaluados en periodos cortos, de periodos máximos de un día y con una

aplicación específica para emergencias ambientales, se han obtenido datos confiables para el tercer escenario, lo cual es importante debido a que en la mayoría de estudios disponibles estos versan de periodos largos de tiempo en horizontes de años para evaluar temas como el cambio climático. Por lo tanto, se sugiere realizar más estudios de precipitación en periodos cortos de días u horas aplicados a las emergencias ambientales, a fin de contrastar los datos de la presente investigación.

## Conclusiones

Es recomendable el uso en materia de fiscalización ambiental del satélite GPM a través de la plataforma GIOVANNI para obtener los valores de precipitación en cualquier ubicación geográfica debido a que presenta un valor de correlación muy alta, 0.6, con los datos de precipitación de estaciones meteorológicas.

Se debe optar por utilizar el satélite GPM en áreas de ocurrencia de emergencias ambientales que estén a distancias mayores de 10 km de estaciones meteorológicas.

Para una obtención de datos precisa del satélite GPM a través de la plataforma GIOVANNI, siempre se debe considerar al momento de la descarga de los datos la diferencia de horas del área de estudio con el horario UTC del satélite GPM.

Cuando se lleven a cabo comparaciones entre datos de estaciones meteorológicas y datos del satélite GPM a través de la plataforma Giovanni para un día, se debe tomar en cuenta el tipo de estación meteorológica debido a que las estaciones meteorológicas convencionales pueden presentar variaciones en la hora de inicio y hora final considerada

en un día; es decir, necesariamente no inicia a las 00:00 horas, sino que dependerá de las horas en las que se hagan las mediciones por parte del personal.

## Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado con el acompañamiento de la Coordinación de Investigación e Innovación para la Fiscalización Ambiental (CINFA) del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

## Referencias

- 24timezones. (2024). *Conversión de hora de Lima a UTC*. Recuperado de <https://24timezones.com/es/difference/lima/utc>
- Basualdo, A. B. (2015). *Manual de buenas prácticas para la generación, el almacenamiento y la difusión de informática climática en instituciones y organismos del MERCOSUR*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Dávila, C., Cubas, F., Laura, W., Ita, T., Porras, P., Castro, A., Trebejo, I., Del Carpio, J., Avalos, G., Villena, D., Valdez, M., Zimmermann, R., & Menis, L. (2021). *Atlas de temperaturas del aire y precipitación del Perú*. Lima, Perú: Red Activa Soluciones Gráficas S. A. C.
- Euscátegui, C., Vanegas, M., & Ávila, K. (2022). *Plan Nacional de Respuesta Primera Temporada Lluvias (marzo-2022)*. Recuperado de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/PNC/PNR-1a-Lluvias-2022.pdf>

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2020). *Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) technical documentation (News Archive)*. Recuperado de [https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-10/IMERG\\_doc\\_201006.pdf](https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-10/IMERG_doc_201006.pdf)

INEE, Red Interagencial para la Educación en Situaciones de Emergencia. (2019). *Emergencia ambiental*. Recuperado de <https://inee.org/es/eie-glossary/emergencia-ambiental>

León, F. M. (2014). *Lanzado el Observatorio de Medición de la Precipitación Global (GPM)*. Recuperado de <https://www.tiempo.com/ram/49642/lanzado-el-observatorio-de-medicion-de-la-precipitacion-global-gpm/>

Mardones, M., Echeverría, F., & Jara, C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas: una Mirada desde El Sur*, (38), 1-24. DOI: 10.5354/0719-5370.2004.27748

NASA, National Aeronautics and Space Administration. (2024). *La misión global de medición de precipitaciones*. Recuperado de <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM>

Rojas, Y., Minder, J., Campbell, L., Massmann, A., & Garreaud, R. (2021). Assessment of GPM IMERG satellite precipitation estimation and its dependence on microphysical rain regimes over the mountains of south-central Chile. *Atmospheric Research*, (253). DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105454

SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). *Reporte meteorológico*. Recuperado de <https://www.regionlalibertad.gob.pe/servicios-en-linea/descargas/reportes-senamhi/12744-reporte-diario-dz3-08set-20/file>

SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2024). *Datos hidrometeorológicos a nivel nacional*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (Informe 2020)*. Recuperado de [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/unesco\\_informe\\_mundial\\_de\\_las\\_naciones\\_unidas\\_sobre\\_el\\_desarrollo\\_de\\_los\\_recursos\\_hidricos\\_2020\\_agua\\_y\\_cambio\\_climatico\\_datos\\_y\\_cifras\\_2020.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/unesco_informe_mundial_de_las_naciones_unidas_sobre_el_desarrollo_de_los_recursos_hidricos_2020_agua_y_cambio_climatico_datos_y_cifras_2020.pdf)

Wang, H., Li, Z., Zhang, T., Chen, Q., Guo, X., Zeng, Q., & Xiang, J. (2023), Downscaling of GPM satellite precipitation products based on machine learning method in complex terrain and limited observation area. *Advances in Space Research*, 72 (6), 2226-2244. DOI: 10.1016/j.asr.2023.05.057

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-09

Artículos

**Sensibilidad de índices de sequía dependiendo de la longitud de registros climatológicos**

**Sensitivity of drought indices depending on the length of climatological records**

Aleida Vilchis-Francés<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8637-2945>

Carlos Díaz-Delgado<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6245-070X>

<sup>1</sup>Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua IITCA-UAEM, Toluca, México, [ayvilchisf@uaemex.mx](mailto:ayvilchisf@uaemex.mx)

<sup>2</sup>Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua IITCA-UAEM, Toluca, México, [cdiazd@uaemex.mx](mailto:cdiazd@uaemex.mx)

Autor para correspondencia: Carlos Díaz-Delgado, [cdiazd@uaemex.mx](mailto:cdiazd@uaemex.mx)

## Resumen

Entre los diversos estimadores de sequía propuestos a nivel mundial no existe suficiente evaluación sobre cuál de ellos presenta menor incertidumbre al aplicarse en una región. Algunos índices han sido utilizados en territorios con geomorfología y regímenes climáticos específicos, así como con cierta disponibilidad de información meteorológica. Generalmente se cuenta con series cronológicas cortas de

las variables meteorológicas requeridas y se desconoce el error de estimación de la sequía asociada con esa longitud de series. Este trabajo presenta un proceso facilitador de la evaluación de la sensibilidad de los índices de sequía meteorológica en función de la información disponible. La sensibilidad se clasificó como excelente, buena, regular y mala de acuerdo con el error de estimación de los índices confrontado con series sintéticas de mil años. Las series sintéticas fueron generadas a partir de las características de la muestra real y funciones de distribución normal y gamma. Se identificó en los resultados que los índices CPI, PNI, RDI, SPI, SPEI y ZI son poco sensibles a la longitud de registros meteorológicos. En particular, SPEI deja de ser sensible a partir de longitudes de registro de 10 años; CPI, PNI, RDI, SPI y ZI, a partir de 20 años. EDI fue más sensible a la longitud de las series y se requirieron registros mayores a 30 años para mejorar su certeza. Por último, la fiabilidad de los índices fue mayor para series sintéticas diarias de  $P$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$  generadas con la función de distribución normal, así como en zonas con mayores  $P$  anuales.

**Palabras clave:** incertidumbre de sequía, error de estimación, índices de sequía meteorológica, precipitación, evapotranspiración, análisis probabilístico.

## Abstract

Among the various drought estimators proposed worldwide, there is not enough evaluation as to which of them presents the least uncertainty when applied in a region. Some indices have been used in territories with specific geomorphology and climatic regimes, as well as certain availability of meteorological information. Generally, there are short time series of the required meteorological variables, ignoring the drought

estimation error associated with that length of series. This work presents a facilitating process to evaluate the sensitivity of meteorological drought indices based on the available information. Sensitivity was classified as excellent, good, medium and poor, according to the estimation error of the indices with respect to synthetic series of one thousand years. The synthetic series were generated from the characteristics of the real sample and the normal and gamma distribution functions. The results identified that the CPI, PNI, RDI, SPI, SPEI and ZI indices are not very sensitive to the extent of meteorological records. In particular, SPEI is no longer sensitive above 10-year record periods; CPI, PNI, RDI, SPI and ZI for 20 years. The EDI was more sensitive to the length of the series and required records of more than 30 years to improve its certainty. Finally, the reliability of the indices was greater for the daily synthetic series of  $P$ ,  $T_{max}$  and  $T_{min}$  generated with the normal distribution function, as well as in areas with higher annual  $P$ .

**Keywords:** Uncertainty due to drought, estimation error meteorological drought indices, precipitation, evapotranspiration, probabilistic analysis.

Recibido: 17/06/2024

Aceptado: 16/02/2025

Publicado *ahead of print*: 20/03/2025

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

La sequía es un fenómeno natural y recurrente que se presenta en cualquier régimen hidrológico, pero también es uno de los fenómenos menos comprendido (Mahmoudi, Rigi, & Kamak, 2019). Debido a su lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, la sequía es difícil de detectar (Penalba & Rivera, 2015); esto provoca que los gobiernos incrementen la vulnerabilidad del socio-ecosistema ante la sequía por aplicación de políticas de gestión de recursos hídricos inadecuadas (PNUD, 2004). Por lo general, dichas políticas implican acciones reactivas cuando el evento ya está en desarrollo, en lugar de ser preventivas y de mitigación de impactos (Arrojo, 2008; Moneo, 2008).

Para entender la sequía se han creado múltiples definiciones para un uso y lugar específicos. Sin embargo, esta variabilidad dificulta la comparación de criterios por su falta de homogeneidad. Lo anterior ha llevado a proponer índices de sequía que buscan estandarizar su cuantificación y evaluación (González, 2005). Estos índices involucran una o más variables hidrológicas, como precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración, humedad del suelo, caudales en ríos, niveles en los acuíferos y almacenamientos en presas (Crespo, 2006). La mayoría de los índices de estimación de sequía tienen escalas de cuantificación diferentes: diaria, semanal, mensual, estacional y anual. Algunos de los índices más usados y evaluados en las últimas décadas han sido el índice estandarizado de precipitación (SPI) y el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI) (McKee, Doesken, & Kleist, 1993; Vicente-Serrano *et al.*, 2012). En estudios previos sobre uso de los índices de sequía, en la mayoría prevalece el aspecto meramente descriptivo, como los de Bordi y Sutera (2002);

Cancelliere, Di Mauro, Bonaccorso y Rossi (2005); Hallack-Alegria y Watkins (2006), y Fernández *et al.* (2009), donde desarrollan análisis pluviométricos para identificar periodos de sequías meteorológicas. De igual forma, los estudios de Fernández-Larrañaga (1997), Fernández y Buscemi (2000), Birkel (2006), y Yahiaoui, Tauaïba y Bouvier (2009) describieron sequías hidrológicas a partir de caudales en zonas específicas de Chile, Argentina, Costa Rica y Argelia, respectivamente. Aunque en las investigaciones de Aburrea y Cebrián (2002), Bayazit y Önöz (2005), y Nadarajah y Gupta (2006) se utilizaron series cronológicas de precipitación y caudales, los resultados solo describieron las características de los eventos de sequías ocurridas en sus respectivas zonas de estudio.

Se identificaron escasos estudios de sensibilidad de índices de sequía en función de la longitud de registros meteorológicos para evaluar la confiabilidad de aplicación de cada estimador. En la investigación realizada por Wu, Hayes, Wilhite y Svoboda (2005) se sugiere el uso de mayores longitudes de datos posibles, para que los valores de sequía con SPI sean más certeros. Por otro lado, en el trabajo de Bayissa *et al.* (2015) se usaron 14 estaciones climatológicas con 56 años de datos y 23 estaciones con 34 años de información para identificar si esas longitudes de registro eran suficientes para la identificación de los patrones de sequía meteorológica con el índice SPI en Etiopía. El estudio de Link, Wild, Snyder, Hejazi y Vernon (2020) concluyó que un conjunto de datos de 100 años es apenas la décima parte de la longitud necesaria para obtener un nivel de confiabilidad adecuada en la estimación de umbrales de sequía. Finalmente, de la revisión de la literatura se observó que el índice más utilizado en las últimas décadas para estimación de sequías fue el

SPI y para algunos casos de estudio solo se indicó la suficiencia del tamaño de la muestra de datos.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal proponer un proceso de análisis de sensibilidad a los índices más utilizados en la estimación de la probable ocurrencia de una sequía meteorológica. Con base en este proceso se cuantificó el nivel de certeza de los índices en función de la longitud de datos meteorológicos involucrados en su cálculo. Se pretende que este análisis sirva de apoyo en la selección del índice más adecuado para el sitio de estudio en particular. Con el empleo de este proceso se validó y caracterizó la certeza de los principales índices reconocidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para la estimación probabilística de la sequía meteorológica (OMM, 2016). Los índices considerados en este estudio fueron los siguientes: índice de precipitación normal (PNI), índice de cuartiles de precipitación (PCI), índice Z-score (ZI), índice estandarizado de precipitación (SPI), índice de precipitación efectiva (EDI), índice de reconocimiento de sequía (RDI) y el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI). El producto final consistió en proporcionar un árbol de decisiones con los límites de aplicación de cada índice y el nivel de certeza alcanzable de acuerdo con la longitud de registros climatológicos disponibles (precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima, según el índice en análisis). Cabe señalar que este trabajo se llevó a cabo con base en información de estaciones meteorológicas del altiplano mexicano, en particular del Estado de México.

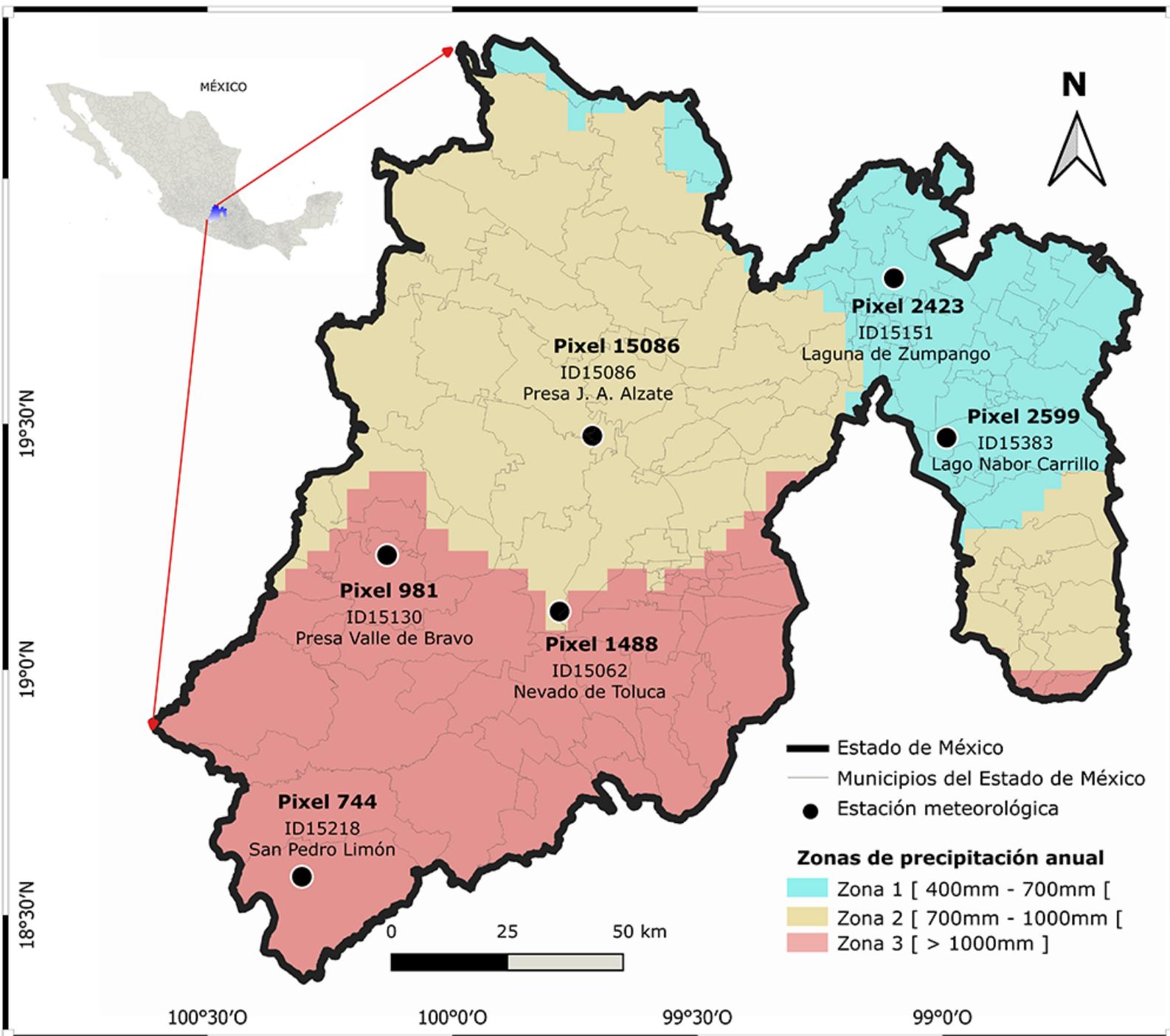
Los objetivos específicos del trabajo fueron los siguientes: a) generar series sintéticas de mil años con datos históricos diarios de precipitación y temperaturas, mediante funciones de distribución normal (o normal truncada cuando la variable bajo análisis solo puede tomar

valores positivos) y gamma, para ser utilizados en las estimaciones de índices de sequía; b) extraer 25 series aleatorias de cada una de las diversas longitudes de registro consideradas (10, 20, 30, 50, 100, 250, 500 y 750 años) para estimar los diferentes índices de sequía; c) contrastar los valores de los índices estimados con base en las series aleatorias para cuantificar los niveles de certeza de los índices; d) construir un árbol de decisión de la sensibilidad de los índices de sequía meteorológica en función de la longitud de los datos para orientar la elección del índice más deseable a utilizar en una zona de estudio.

## Materiales

### Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la región del altiplano central de México (Figura 1). Tiene una altitud promedio de 2 952 msnm en un rango entre 226 y 5 452 msnm; cuenta con una superficie de 65 300 km<sup>2</sup> entre las coordenadas 100.72° a 98.45° longitud oeste y 18.31° a 20.34° latitud norte (INEGI, 2020). Para comprensión de la metodología, el análisis se concentra en seis sitios (Figura 1), que representan diferentes zonas de precipitación anual cercanas a cuerpos de agua (lagos, lagunas y presas), y son importantes zonas de recarga de los diferentes acuíferos. La importancia de tales sitios radica en que la información y disponibilidad hídrica anual son recursos utilizados para gestión del agua en la región.



**Figura 1.** Estaciones meteorológicas y agrupación de zonas por su régimen pluviométrico anual de la región del Altiplano Central de México.

## Datos meteorológicos

Se consideraron 746 estaciones climatológicas con datos diarios de precipitación ( $P$ ), temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y temperatura mínima ( $T_{min}$ ) para el periodo 1960-2009, a fin de conformar la base de datos inicial o semilla. La selección de este periodo es porque contiene el mayor número de estaciones con información coincidente en la zona de estudio. La información se extrajo de la base de datos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2012). Por la variabilidad climática que presenta la región del altiplano central de México, se dividió en tres zonas de acuerdo con su régimen pluviométrico anual: a) zona 1, con precipitaciones menores a 700 mm; b) zona 2, con precipitaciones entre 700 y 1 000 mm, y c) zona 3 con precipitaciones mayores a 1 000 mm (Figura 1).

## Procesamiento de datos meteorológicos

### Interpolación diaria

Los datos diarios puntuales de las variables  $P$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$  de las 746 estaciones meteorológicas se interpolaron para expresar la información en formato matricial con 62 columnas y 56 renglones (3 742 pixeles con área de 18.81 km<sup>2</sup> cada pixel). Esto puede verse ahora como 3 742 sitios con información de las variables consideradas. Para cada variable meteorológica se obtuvieron 18 250 mapas interpolados de manera diaria. Los parámetros de las variables de los días 29 de febrero de cada año bisiesto se acumularon al 28 de febrero para obtener una serie homogénea de 50 años con 365 días, tal como lo sugieren Byun y Wilhite

(1999). Una vez generados los mapas de las variables meteorológicas, se calculó la evapotranspiración potencial diaria (ETP) por medio del método de Thorntwaite (Da Silva, Silva, Póvoas, & Ramos, 2023) y con el empleo de los mapas interpolados de  $P$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$  del periodo de análisis.

## Parámetros estadísticos

A partir de las imágenes diarias de precipitación y temperaturas se calcularon los dos primeros momentos estadísticos  $\mu_1$  (media) y  $\mu'_2$  (varianza) de cada una de las variables. Además, se obtuvieron las imágenes del comportamiento promedio diario de cada variable meteorológica. Este régimen espacial de comportamiento se obtuvo como el promedio de los valores de los 50 años de cada día juliano del año. Con este proceso se obtuvieron 365 imágenes del promedio diario del comportamiento para cada variable utilizada.

## Método

En la Figura 2 se muestra de forma estructurada el proceso metodológico utilizado para tres casos de análisis. El caso I fue para obtener la sensibilidad de índices de sequía del periodo original de 50 años (1960-2009 con mapas diarios de  $P$  y ETP). El caso II y caso III correspondieron al análisis de la sensibilidad de índices de sequía con series sintéticas de 1 000 años generadas para las variables  $P$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$ , con características de una función de distribución normal (FDN) y otra con la función de distribución gamma (FDG), respectivamente.

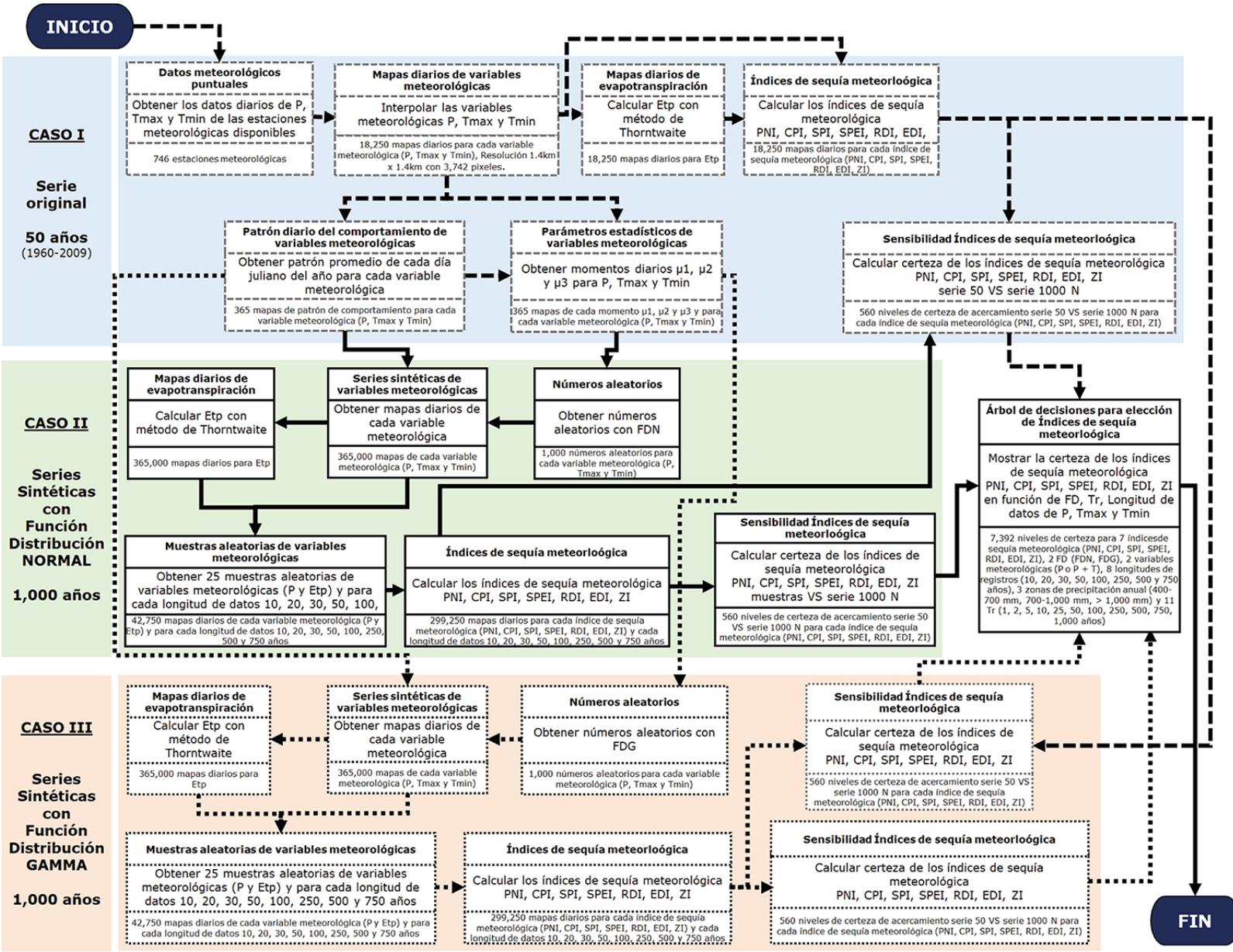


Figura 2. Diagrama general de flujo de la estructuración del proceso metodológico.

## Caso I

Corresponde al periodo original de 50 años (1960-2009) con los mapas diarios interpolados de las variables  $P$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$ , así como de los calculados para la ETP. Una vez obtenidos los mapas diarios, se suman los mapas correspondientes para obtener los mapas mensuales. De acuerdo con las variables requeridas para cada índice, se calcula la magnitud de la sequía mensual para cada uno de los índices de sequía considerados en este trabajo.

### Índices de sequía meteorológica

Los índices de sequía que se tomaron en cuenta para el análisis de sensibilidad fueron los siguientes: porcentaje de precipitación normal (PNI) (Gibbs & Maher, 1967; Escalante & Reyes, 2005); cuantiles de precipitación (CPI) (Escalante & Reyes, 2005); índice  $Z$ -score (ZI) (Sirdaş & Şen, 2003); índice estandarizado de precipitación (SPI) (McKee *et al.*, 1993); índice de precipitación efectiva (EDI) (Byun & Wilhite, 1999); índice de reconocimiento de sequías (RDI) (Tsakiris & Vangelis, 2005), y el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2012). En la Tabla 1 se muestran los indicadores utilizados para analizar su sensibilidad de acuerdo con la longitud de registros de la serie meteorológica requerida (precipitación y temperatura).

**Tabla 1.** Características de los índices de sequía utilizados. Modificada de OMM (2016).

Nombre del índice	Sigla	VARIABLES DE ENTRADA	Facilidad de uso (OMM, 2016)	Referencia
Cuantiles de precipitación	CPI	$P$		Gibbs y Maher (1967)
Precipitación efectiva	EDI	$P$		Byun y Wilhite (1999)
Precipitación normal	PNI	$P$		Bhalme y Mooley (1980)
Reconocimiento de sequías	RDI	$P, T_{max}, T_{min}$		Tsakiris y Vangelis (2005)
Precipitación- evapotranspiración estandarizado	SPEI	$P, T_{max}, T_{min}$		Vicente-Serrano, Berguería y López-Moreno (2010)
Estandarizado de precipitación	SPI	$P$		McKee <i>et al.</i> (1993)
$Z$ -score	ZI	$P$		Sirdaş y Şen (2003)

$P$  = precipitación

$T_{max}$  = temperatura máxima

$T_{min}$  = temperatura mínima

De acuerdo con la OMM, el código de color es por la facilidad de uso del índice, donde el verde es de fácil uso y el amarillo es medianamente fácil de usar.

## Caso II y caso III

El análisis fue realizado con las series sintéticas de mil años, generadas para los mapas diarios de las variables  $P$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$ , y con características de una FDN y otra con FDG. Cabe resaltar que las series

sintéticas fueron generadas a partir de las características estadísticas de las muestras de 50 años de las 746 estaciones climatológicas consideradas.

## Series sintéticas

Los estudios hidrológicos —y en particular el análisis de sequías— están fundamentados principalmente en el comportamiento de variables como precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudales, entre otras. Estas variables, debido a su naturaleza, pueden ser calificadas como variables aleatorias, por lo que se consideran impredecibles de forma determinística (Linsley, Kholer, & Paulhus, 1988; Chow, Maidment, & Mays, 1994). A menudo los registros históricos de tales variables son cortos para análisis de frecuencias (< 50 años), donde lo deseable es utilizar series de datos más largas. Una forma de incrementar el número de datos de cada variable puede ser la generación sintética de estos y considerarlos como observaciones probables de la variable. Dichos datos sintéticos tienen las mismas propiedades estadísticas del registro histórico y, sobre todo, son igualmente probables de ocurrir en el futuro. Las series sintéticas generadas no constituyen físicamente nuevos datos hidrológicos, sino que hacen mejor uso de la información estadística contenida en el registro histórico, por lo que estos valores contienen las mismas características descriptivas del fenómeno, pero están sujetos a los mismos errores de muestreo de los datos de origen (Campos-Aranda, 2007).

La generación de una secuencia aleatoria de una variable continua, con distribución de probabilidad definida, es llevada a cabo haciendo uso de la relación que existe entre la función de distribución de probabilidad

de la variable  $y$  de la distribución uniforme. Se asume que la función de probabilidad se distribuye de modo uniforme en el intervalo  $(0, 1)$  (Campos-Aranda, 2007).

La técnica general para simulación de variables aleatorias continuas, a través de la función inversa de transformación, es la siguiente: sea  $U$  una variable aleatoria uniforme en el intervalo  $(0, 1)$ , para toda función  $F$  de distribución continua, se define la variable aleatoria continua como  $X = UF^{-1}$ . Entonces, la variable aleatoria  $X$  toma la forma de la función de distribución  $F$ .  $UF^{-1}$  se define igual al valor  $X$  para el cual  $F(x) = U$ , entonces  $F_X(a) = P\{X \leq a\} = P\{UF^{-1} \leq a\}$ .  $F(X)$  es una función monótona  $UF^{-1} \leq a$  si y solo si  $U \leq F(a)$ . Se supone una variable aleatoria  $X$  de distribución continua  $F$  cuando  $F^{-1}$  es calculada para simular un número aleatorio  $U$  con ajuste  $X = UF^{-1}$  (Ross, 1985).

El análisis probabilístico de la información climatológica se hizo bajo la hipótesis de que la variable a modelar proviene de una función de distribución de probabilidades normal o gamma. Estas funciones han sido ampliamente utilizadas para análisis del comportamiento de precipitación diaria, mensual y anual (Campos-Aranda, 2007; Linsley *et al.*, 1988; Escalante & Reyes, 2005). La función normal ha sido recomendada para análisis de precipitación con valores mensuales de zonas húmedas y la función gamma para valores diarios en zonas secas (Linsley *et al.*, 1988). En este trabajo se asumieron estas recomendaciones de FDN y FDG como hipótesis de modelación probabilística para la generación sintética de datos diarios de precipitación, y temperaturas máximas y mínimas.

## Generación de series sintéticas

En este análisis, se denominó como "serie histórica" a los datos diarios observados durante 50 años (1969-2009) de las 746 estaciones meteorológicas. Asimismo, se llamó "serie semilla" a los 365 000 datos diarios sintéticos generados para la serie de 1 000 años. Se generó la serie semilla de mil años para cada variable meteorológica por medio de las FDN y FDG. Los parámetros estadísticos de la FDN y FDG se estimaron a partir de la serie histórica. Para la serie semilla de  $P$  con la FDN, los valores negativos que resultaron de la generación sintética de datos se consideraron como precipitaciones nulas con base en la naturaleza del fenómeno, lo que dio lugar a una función normal truncada (Yevjevich, 1972). Para generar las series semillas de cada variable meteorológica se propuso el siguiente proceso:

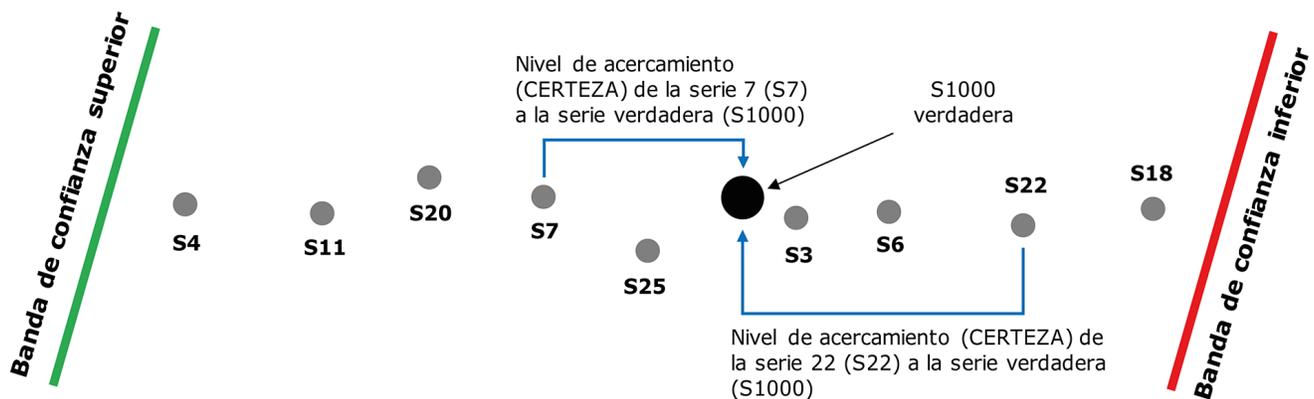
1. Obtener mil números aleatorios de la FDN para cada día juliano.
2. Multiplicar los números aleatorios FDN por cada mapa del patrón de comportamiento diario de cada variable meteorológica, obtenidos en la sección interpolación diaria. Este proceso se realiza para los 365 días julianos del año, por lo que se generaron 365 000 imágenes diarias de cada variable meteorológica.
3. Obtener la ETP con las series semillas de  $T_{max}$  y  $T_{min}$  (en este trabajo se calculó por medio del método de Thornthwaite).
4. Obtener las series mensuales de mil años para la variable  $P$  y ETP (sumando los días correspondientes de cada mes).

5. Extraer aleatoriamente 25 muestras mensuales de  $P$  y ETP para cada una de las diferentes longitudes de datos: 10, 20, 30, 50, 100, 250, 500 y 750 años.

6. Repetir los pasos del 1 al 6 para generar series sintéticas de mil años para FDG.

### Niveles de certeza de los índices

El nivel de certeza de cada índice de sequía meteorológica se evaluó como el grado de acercamiento de las 25 series aleatorias de cada longitud de registro ("series de longitudes diferentes"), contrastado con los resultados de índices de la serie sintética de mil años ("series de resultados verdaderos"). Entonces, el nivel de certeza fue calculado como la medida de acercamiento que cada serie de longitudes diferentes tuvo con respecto a las series de resultados verdaderos de cada índice de sequía meteorológica (Figura 3).



**Figura 3.** Niveles de certeza entre serie verdadera (mil años) y las 25 series aleatorias de cierta longitud de registro.

Las líneas en color verde y rojo conforman las bandas de confianza inferior y superior, respectivamente. Los círculos grises representan los resultados de cada una de las 25 series aleatorias, simbolizadas desde S1 hasta S25. El círculo central negro representa el resultado de la serie sintética de mil años.

Para obtener el nivel de certeza, primero se obtuvieron los cuantiles para diferentes periodos de retorno ( $Tr$ ) de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 750 años (correspondientes a las probabilidades 0.50, 0.80, 0.90, 0.96, 0.98, 0.99, 0.996, 0.998 y 0.999, respectivamente). Después se graficaron, para cada cuantil, los resultados de las 25 muestras aleatorias de cada periodo de retorno. Estos valores crean bandas de posibles resultados para cada cuantil o bandas de confianza (Figura 3). Finalmente, el nivel de certeza de cada índice se calculó como el error porcentual entre cada cuantil de cada periodo de retorno y el cuantil de la serie sintética de mil años.

## Sensibilidad de los índices

Se propuso una categoría de sensibilidad de índices de sequía a partir de los resultados de la certeza de su estimación con base en la longitud del periodo de datos; las categorías fueron excelente, bueno, regular y malo. Para obtener dichas categorías se ordenaron los resultados de errores de estimación de cada índice de acuerdo con el tamaño de la muestra, periodo de retorno y zona de precipitación homogénea. Luego se ordenaron estos datos de menor a mayor. Después se obtuvieron los valores correspondientes al 10, 30 y 50% de esos datos de errores de estimación ordenados, denominados VE10, VE30 y VE50, respectivamente. Para la categoría de "excelente" se agruparon todos los

valores menores a VE10; para la categoría “bueno” se consideraron aquellos resultados con error entre VE10 y VE30; para la categoría de “regular”, errores entre VE30 y VE50; para la categoría de sensibilidad “malo” se tomaron los valores correspondientes a los errores mayores a VE50. Este proceso fue replicado para cada una de las bandas de confianza tanto para la inferior como superior (mínima y máxima). Finalmente, la sensibilidad de los índices se integra como el rango de errores de estimación, que fueron calculados por los respectivos valores de las bandas de confianza.

## Construcción del árbol de decisiones

Como apoyo a los usuarios, se propuso un árbol de decisiones para orientarlos sobre el uso de algunos de los índices de sequía meteorológica más conocidos. La sugerencia de elección del índice estará en función de los siguientes criterios de selección:

I. Variables meteorológicas de las que se disponga: solo precipitación, o bien, precipitación y temperaturas.

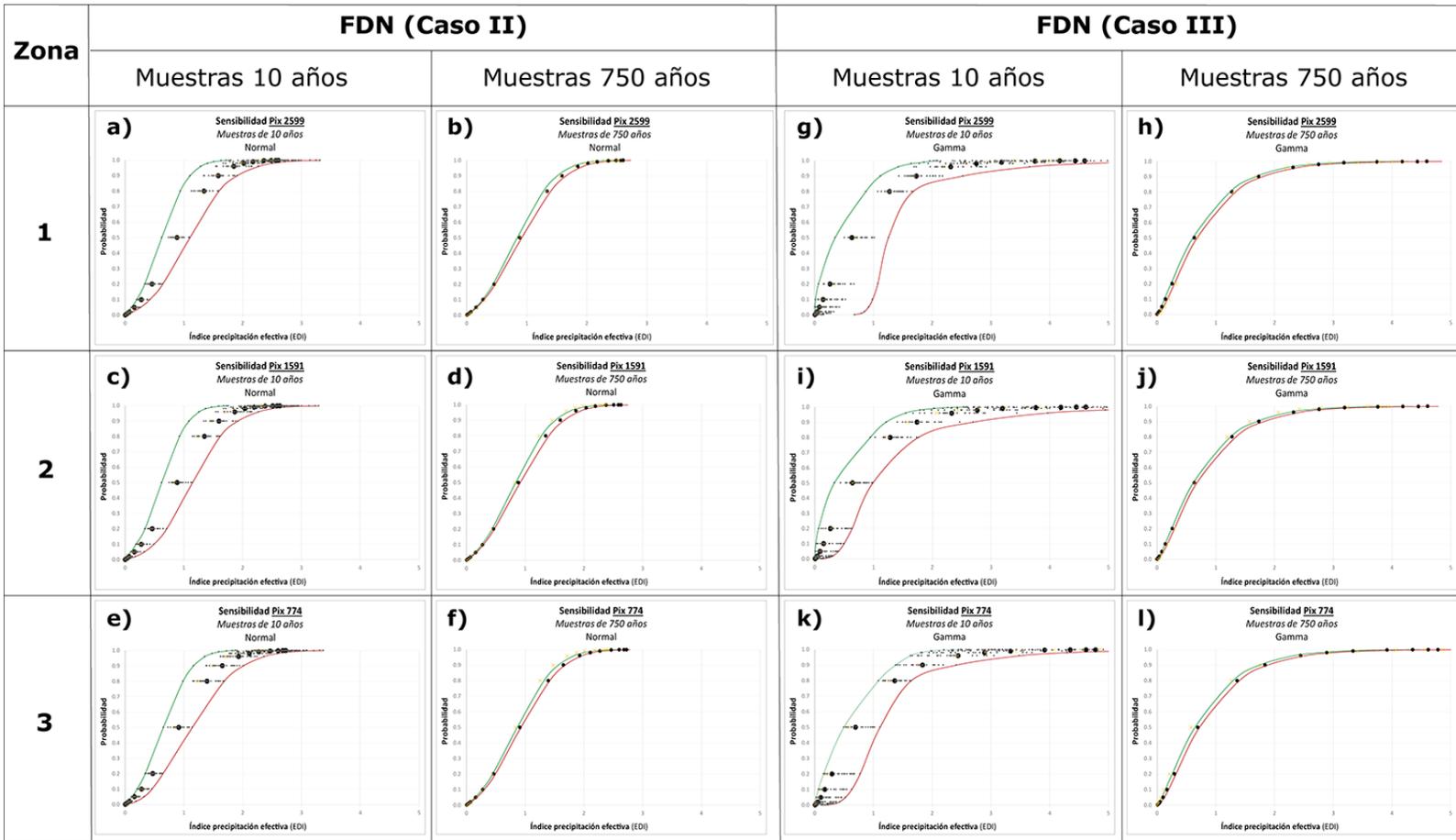
II. Rango de longitud de los registros de las variables meteorológicas disponibles: 10-20; 20-30; 30-50; 50-100; 100-250; 250-500; 500-700 años.

III. Rango de precipitación anual de la zona de estudio (entre 400-700 mm, 700-1 000 mm, o bien mayor de 1 000 mm).

Además de los criterios anteriores, el usuario también deberá seleccionar el nivel de error que desea admitirse en los cálculos del fenómeno para seleccionar el índice de sequía más adecuado. El árbol de decisiones se proporciona tanto para FDN como para FDG.

## Resultados

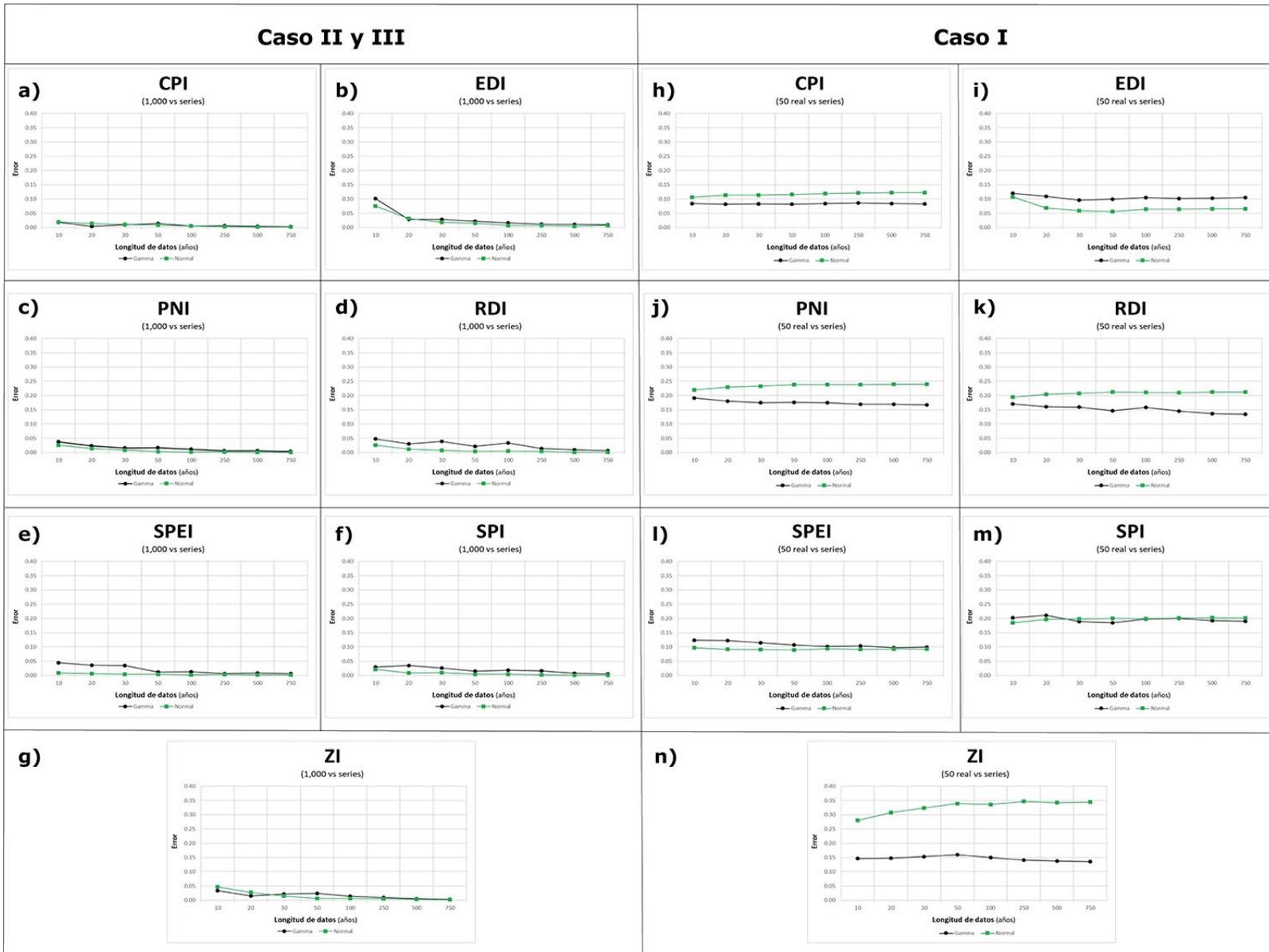
Se presentan, a manera de ejemplo, la Figura 4 (a-l) que expresa el comportamiento de la sensibilidad del índice EDI para 10 y 750 años de longitud de datos tanto para FDN como FDG. En la Figura 4 se aprecia que para cualquier régimen de precipitación los errores del índice aumentan si la longitud de registros disminuye. Es decir, para tamaños de muestras de 10 años, el ancho de las bandas de confianza es mayor que para muestras de 750 años. Esto significa que para longitudes cortas de datos existe una gran variación en los resultados de acercamiento a la serie de mil años. Sucede lo opuesto con los resultados de muestras de mayor longitud, pues los niveles de acercamiento a la serie de mil años fueron muy cercanos a ésta, con lo que se generaron ancho de las bandas de confianza más estrechos. Este comportamiento de sensibilidad ante el tamaño de la longitud de datos fue el mismo para todos los índices analizados.



**Figura 4.** Ejemplo de sensibilidad del índice EDI para 10 y 750 años de longitud de registro con FDN (4a-4f) y FDG (4g-4l).

En la Figura 5 se observa la sensibilidad de los siete índices de sequía con FDN y FDG, expresada como el error de cada índice para cada longitud de registros. La Figura 5 (a-g) muestra el comportamiento de sensibilidad de índices de sequía para FDN (caso II) y la Figura 5 (h-n) para FDG (caso III). De manera global, los resultados con FDN tienen menores valores de error que FDG. Entonces, se asume que utilizar FDG aporta más sensibilidad a los índices de sequía que FDN. De manera particular, el índice CPI no muestra sensibilidad significativa ante cambio

de longitud de datos tanto para FDN como FDG. Otro índice que mostró poca sensibilidad ante la longitud de datos fue PNI para FDN y FDG, siempre y cuando se usen a partir de 20 años de longitud de datos. Los índices EDI y SPEI pierden sensibilidad a partir de 50 años de longitud de registros para FDG; pero si se usa SPEI con FDN, este no es sensible a longitudes de datos. En cambio, el índice RDI es muy sensible para registros menores de 30 años para FDN, pero se alarga este comportamiento para FDG hasta los 250 años. El índice ZI pierde sensibilidad cuando es mayor a 100 años de longitud de registro para FDN y FDG. Sin embargo, el índice SPI no es sensible ante la longitud de datos después de 10 años para FDN, pero es más sensible con la FDG.



**Figura 5.** Error de los índices de sequía meteorológica para datos generados con FDN y FDG.

Lo mostrado en la Figura 5 (a-g) corresponde al método de comparación de serie sintética de mil años con series de diferente tamaño de muestra y las gráficas (h-n) de la Figura 5 corresponden al método de

comparación de serie original de 50 años con series de diferente tamaño de muestra.

También se presentan tanto la Tabla 2 como la Tabla 3 como soporte para la toma de decisiones en la elección del mejor índice de sequía de acuerdo con cierta longitud de registros disponibles y con cierto régimen pluviométrico de la zona analizada. En dichas tablas se muestra la categoría de sensibilidad de los siete índices de sequía meteorológica analizados en este trabajo tanto para datos generados con FDN como para FDG. Igualmente, en estas tablas se tienen las categorías de la sensibilidad de los estimadores de sequía en código de colores para una mejor selección. El color azul es para la categoría "Excelente"; el verde, para "Buena"; el amarillo, para "Regular", y el rojo para la categoría "Mala".

**Tabla 2.** Categorías de sensibilidad de índices de sequía meteorológica de acuerdo con FDN, zona de precipitación, longitud de registro y periodo de retorno.

Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras																									
ÍNDICE	Tr	Zona 1								Zona 2								Zona 3							
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)							
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750
CPI	1	0.11	0.05	0.06	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	25	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	50	0.05	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	100	0.05	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
	250	0.05	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
	500	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
	750	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
1000	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
EDI	1	0.20	0.15	0.12	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.40	0.08	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.45	0.12	0.05	0.02	0.01	0.01	0.03	
	2	0.08	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
	5	0.08	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
	10	0.08	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
	25	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.09	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	
	50	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	
	100	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	
	250	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	
	500	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	
	750	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	
1000	0.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01		



**Tabla 3.** Categorías de sensibilidad de índices de sequía meteorológica de acuerdo con FDG, zona de precipitación, longitud de registro y periodo de retorno.

Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras																										
ÍNDICE	T <sub>r</sub>	Zona 1								Zona 2								Zona 3								
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	
CPI	1	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.06	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.06	0.01	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	5	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	10	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	25	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	50	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	100	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	250	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
	500	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
	750	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
1000	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
EDI	1	0.50	0.41	0.09	0.31	0.50	0.36	0.27	0.32	0.50	0.50	0.50	0.50	0.36	0.19	0.18	0.12	0.50	0.50	0.50	0.54	0.31	0.06	0.03	0.08	
	2	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	
	5	0.08	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	
	10	0.10	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.08	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	
	25	0.12	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10	0.04	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	
	50	0.12	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.11	0.05	0.03	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	
	100	0.13	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.12	0.05	0.04	0.05	0.02	0.01	0.02	0.01	0.10	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	
	250	0.13	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.13	0.05	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.11	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	
	500	0.14	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.13	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.11	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	
	750	0.14	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.14	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.12	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	
1000	0.14	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.14	0.06	0.04	0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.12	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00		
PNI	1	0.11	0.07	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00	0.06	0.04	0.04	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.15	0.09	0.04	0.07	0.01	0.01	0.02	0.01	
	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
	10	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	
	25	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	
	50	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.06	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	
	100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.07	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	
	250	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.08	0.04	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	
	500	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	
	750	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	
1000	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.09	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01		

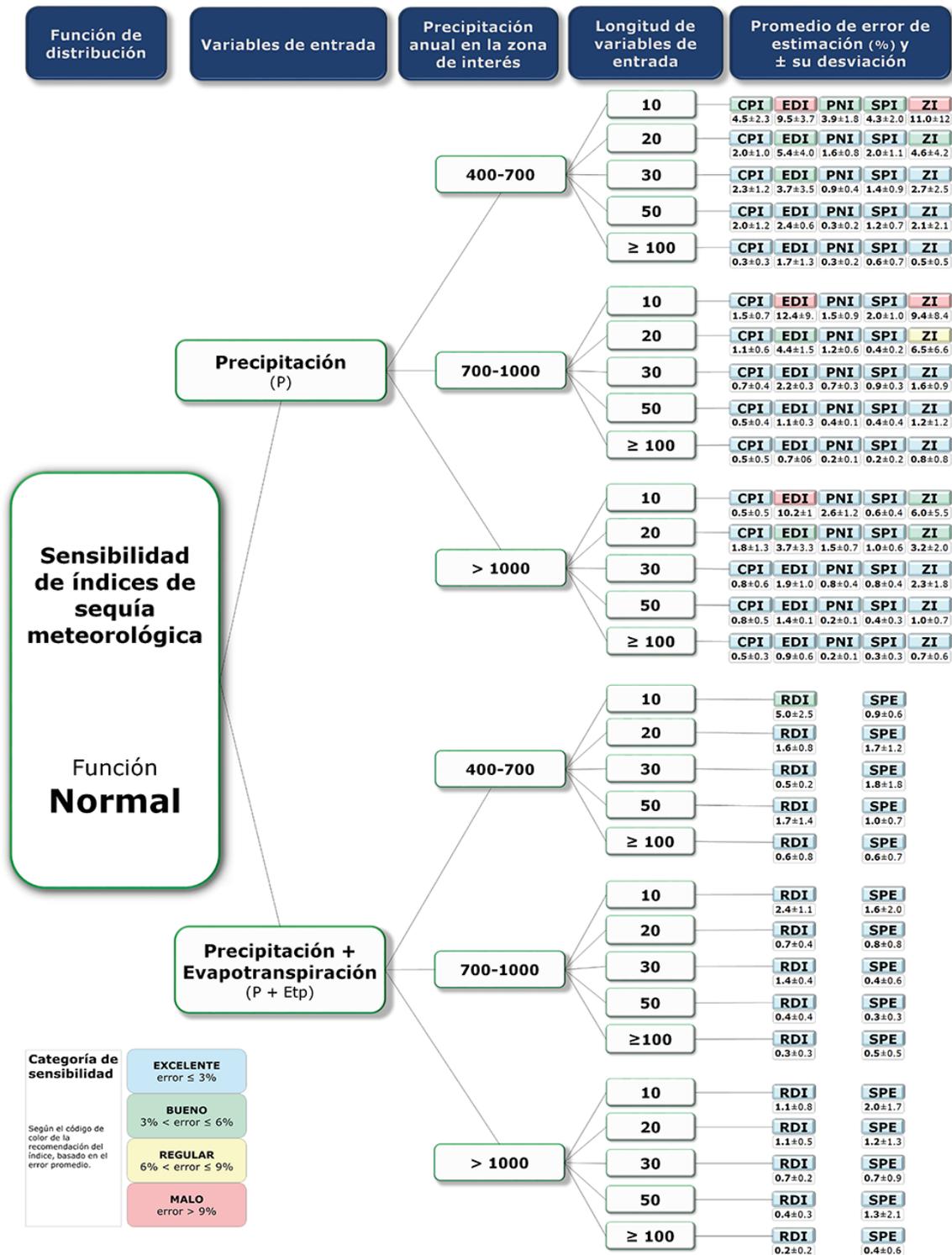
Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras

ÍNDICE	Tr	Zona 1									Zona 2									Zona 3								
		Longitud de datos (años)									Longitud de datos (años)									Longitud de datos (años)								
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750			
RDI	1	0.44	0.44	0.34	0.16	0.22	0.12	0.05	0.02	0.36	0.28	0.26	0.18	0.18	0.05	0.03	0.01	0.10	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03			
	2	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			
	5	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00			
	10	0.04	0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01			
	25	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.02	0.01	0.00	0.07	0.05	0.05	0.03	0.04	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			
	50	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.03	0.01	0.01	0.08	0.05	0.06	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			
	100	0.05	0.05	0.06	0.02	0.06	0.03	0.02	0.01	0.09	0.05	0.07	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01			
	250	0.06	0.05	0.06	0.02	0.06	0.03	0.02	0.01	0.09	0.06	0.07	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01			
	500	0.06	0.06	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.01	0.10	0.06	0.08	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02			
	750	0.06	0.06	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.01	0.10	0.06	0.08	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02			
1000	0.06	0.06	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.01	0.10	0.06	0.08	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02				
SPEI	1	0.42	0.32	0.13	0.09	0.05	0.02	0.03	0.03	0.32	0.13	0.15	0.04	0.03	0.03	0.03	0.08	0.09	0.07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01				
	2	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				
	5	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
	10	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
	25	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.05	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00				
	50	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.06	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00				
	100	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00				
	250	0.08	0.06	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07	0.06	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00				
	500	0.08	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.08	0.07	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00				
	750	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.08	0.07	0.08	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00				
1000	0.09	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.09	0.07	0.08	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00					
SPI	1	0.19	0.25	0.08	0.09	0.10	0.08	0.02	0.01	0.19	0.18	0.14	0.07	0.08	0.08	0.03	0.08	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02				
	2	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	5	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
	10	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01				
	25	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.05	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				
	50	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				
	100	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01				
	250	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.07	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01				
	500	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.08	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01				
	750	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.08	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01				
1000	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.03	0.08	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01					
ZI	1	0.59	0.26	0.33	0.08	0.06	0.06	0.04	0.04	0.55	0.24	0.23	0.18	0.07	0.05	0.04	0.37	0.28	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02				
	2	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00				
	5	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00				
	10	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00				

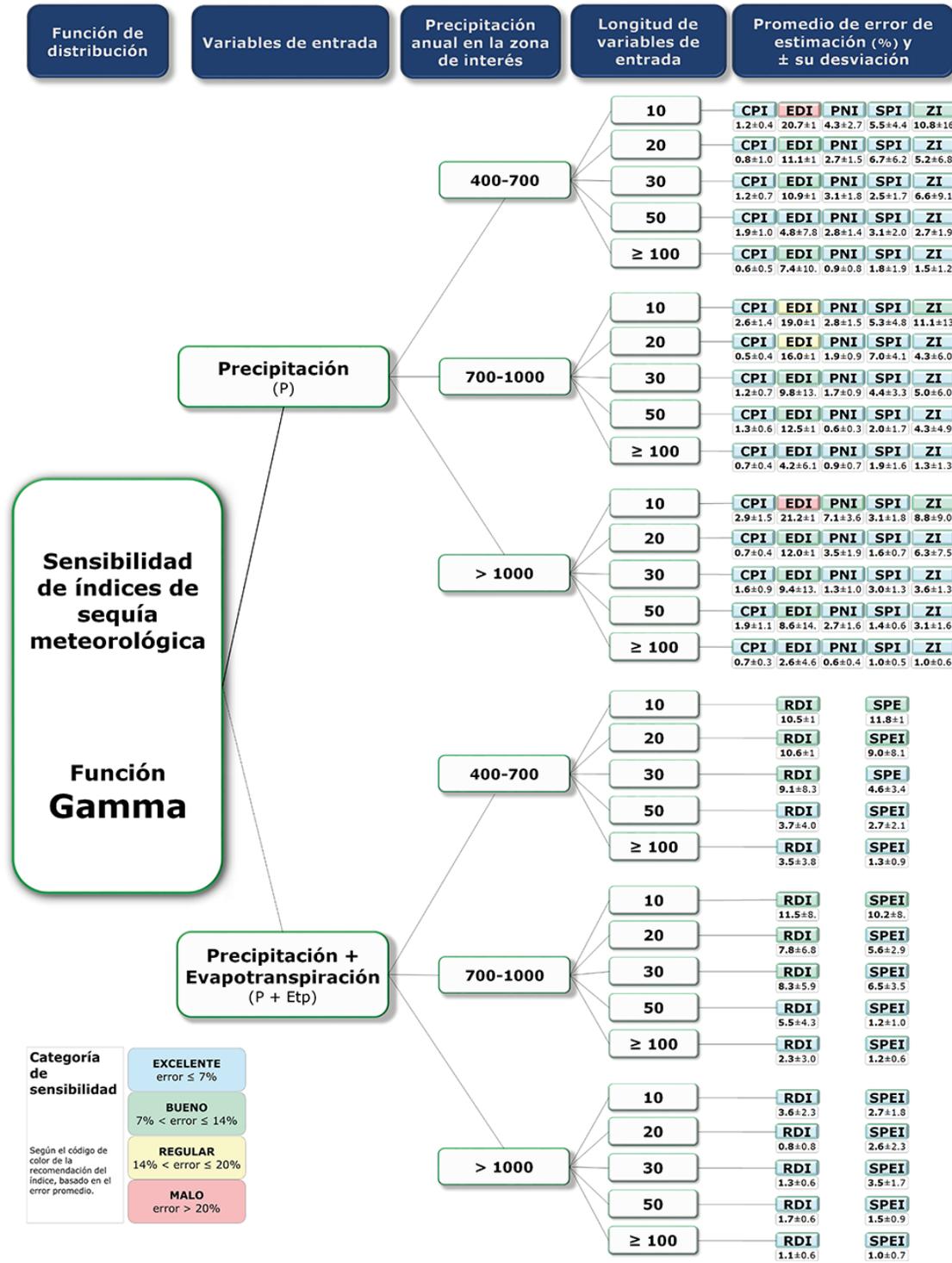
Caso III: series sintéticas 1 000 años vs. muestras																									
ÍNDICE	$Tr$	Zona 1								Zona 2								Zona 3							
		Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)								Longitud de datos (años)							
		10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750	10	20	30	50	100	250	500	750
25	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	
50	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	
100	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00	
250	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00	
500	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00	
750	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00	
1000	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00	

Para el caso II, con datos de FDN (Tabla 2), se observa de manera general que la mayoría de los estimadores de sequía podría usarse con longitudes de registro mayores a 10 años y  $Tr > 2$  años. Una notable excepción fue el índice SPEI, que mostró bajos niveles de errores de estimación desde longitudes de datos de 10 años y para cualquier  $Tr$ . Es importante señalar que para  $Tr < 2$  años, los índices CPI, EDI y ZI tienen errores significativos de estimación, por lo que deberían usarse con cautela. Para el caso III, con datos FDG (Tabla 3), todos los errores de los índices analizados sugieren el uso de los mismos con  $Tr > 2$  años, con excepción de CPI y SPI que tuvieron errores muy bajos. De manera particular, los índices CPI, PNI, SPI y ZI podrían usarse con seguridad a partir de 10 años de longitudes de datos. Se recomienda el uso de los índices EDI y SPEI a partir de series de 20 años de longitud. Cabe resaltar que para casos prácticos, los valores de sequía con  $Tr < 2$  años también representarían los valores para periodos de estiaje. Los valores mostrados en ambas figuras (Tabla 2 y Tabla 3) corresponden a los errores estándar para cada índice, donde el color azul es para categoría "Excelente", el verde es para "Buena", el color amarillo es para la categoría "Regular" y el rojo para "Malo".

Por último, en la Figura 6 se muestra el árbol de decisiones como apoyo para seleccionar el índice de sequía meteorológica más idóneo en alguna zona de estudio. La selección estará en función de las variables de entrada, longitud de registros disponibles de las variables de entrada y régimen pluviométrico anual de la zona. La Figura 6a es útil cuando se asume que las variables meteorológicas siguen una FDN y la Figura 6b para una FDG. Para el uso de los árboles de decisión de la Figura 6, también debe asumirse el valor de error de estimación de los índices para el cálculo de sequía meteorológica en caso de que se muestren más de dos opciones de estimadores. Asimismo, en ambas figuras se considera que los rangos de los valores de error están de acuerdo con el promedio de los errores estándar de estimación para  $T_r$  desde 1.0 hasta mil años. De manera general, se observa que EDI reduce los errores de estimación a partir de 20 años de longitud de registro tanto para FDN como para FDG.



**Figura 6a.** Árbol de decisiones para seleccionar el índice de sequía meteorológica con FDN.

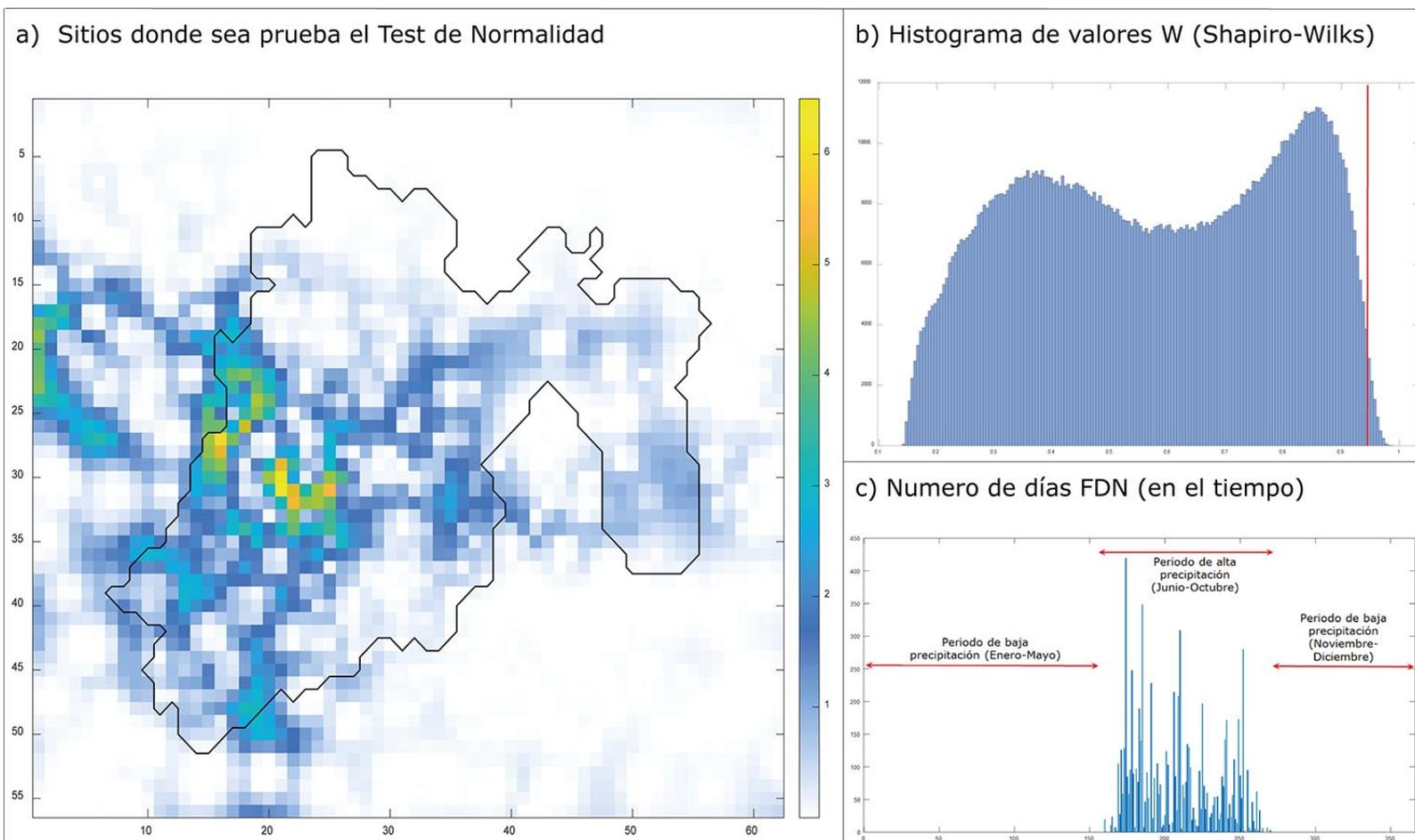


**Figura 6b.** Árbol de decisiones para seleccionar el índice de sequía meteorológica con FDG.

## Prueba de normalidad de la serie original de precipitación de 50 años

Se realizó una prueba de normalidad a la serie original de 50 años de precipitación diaria. La prueba se ejecutó con el método de Shapiro-Wilks, con la hipótesis principal a probar  $H_0$ : la serie de precipitación sigue una función de distribución normal ( $p\text{-value} \geq 0.05$ ), y con hipótesis alterna  $H_1$ : la serie de precipitación no sigue una función de distribución normal ( $p\text{-value} < 0.05$ ). Debido a que la serie de precipitación se usó como semilla para generar las series sintéticas FDN y FDG, el análisis de normalidad se realizó para cada día juliano de la serie diaria de precipitación de 50 años. Entonces, las series de cada día juliano estuvieron conformadas por 50 datos. En la Figura 7a se muestran los resultados de la prueba de normalidad, es decir, los sitios donde los días julianos en los que  $H_0$  fue aceptada. Los resultados mostraron que solamente en 1 284 pixeles del mapa (37 %), algunas series de datos julianos de la precipitación original siguen una FDN y como máximo se contabilizaron seis series de datos julianos. En la Figura 7b se observa el histograma de los valores del coeficiente de correlación ( $W$ ) de la prueba de Shapiro-Wilks, calculado para todos los pixeles de la zona de estudio y para todas las 365 series de datos julianos de precipitación. En esta figura se observa que para el valor mínimo de corte (para aceptar que los datos tienen una buena correlación con series normales), con  $n = 50$  y  $\alpha = 0.05$ , el valor mínimo es  $W = 0.947$ . Por lo que, prácticamente, los datos de las series no cumplen la prueba de normalidad. Por último, en la Figura 7c se observan las series de días julianos que cumplen con la prueba de normalidad, donde a partir del día 160 y hasta el 270 se cumple

en promedio con 60 pixeles de cada mapa (menos del 2 % de los sitios de análisis). Como conclusión de esta prueba realizada a la serie original, las series para cada día juliano no sigue una FDN, pues en general, los datos siguen una FDG. Asimismo, los pocos sitios donde se cumplió esta prueba de normalidad correspondieron a días con precipitación significativa, es decir, solo se cumple la prueba de normalidad para la época de lluvias en la región de estudio.



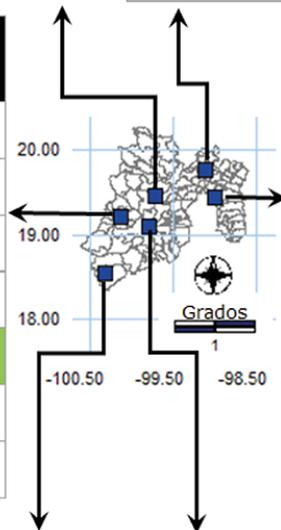
**Figura 7.** Prueba de normalidad de la serie original de 50 años.

Los resultados del análisis de sensibilidad para la serie original de precipitación de 50 años (caso I) se muestran en la Figura 8. En esta gráfica se presentan los siete índices analizados para los seis sitios de las presas, lagos y lagunas de interés. En los seis sitios de análisis, la prueba de normalidad solo fue aprobada entre los meses de mayo a octubre (que corresponde con el periodo de precipitación). En general, todos los índices mostraron menos del 10 % de error respecto a la serie sintética de mil años con FDN. En cambio, cuando la serie sintética se generó con datos de FDG, los errores aumentaron en la localidad de San Pedro Limón hasta el 20 % para los índices ZI y SPEI, así como hasta 16 % para RDI. De igual manera, con datos de FDG para la serie sintética, en todos los sitios se observó un aumento entre el 10 y 15 % para los índices PNI, EDI y SPI. Por otro lado, los índices que menos error presentaron en la mayoría de los sitios analizados fueron EDI y SPEI con FDN, así como CPI, EDI, SPI y SPEI para FDG. Ordenando de menor a mayor los resultados de errores de estimación de los índices, EDI fue el mejor para los sitios de interés, seguido de SPEI, ZI y SPI.

Pixel ID	1591	Índice	Error Estándar FDN	Error Estándar FDG
<b>Nombre de estación</b>	CPI		7.6%	0.4%
Presas José Antonio Alzate	PNI		5.0%	8.3%
<b>Zona</b>	2	<b>EDI</b>	<b>1.1%</b>	2.6%
$P_{\text{anual}} = ]700-1,000]$ mm	RDI		8.6%	1.6%
<b>CLICOM ID</b>	15086	SPEI	2.7%	1.2%
<b>Meses que pasan Test de Normalidad</b>	may, jun, jul, oct	<b>SPI</b>	8.7%	<b>0.4%</b>
		<b>ZI</b>	5.1%	<b>0.4%</b>

Pixel ID	2423	Índice	Error Estándar FDN	Error Estándar FDG
<b>Nombre de estación</b>	CPI		6.3%	3.4%
Laguna de Zumpango	PNI		8.8%	11.7%
<b>Zona</b>	1	<b>EDI</b>	<b>1.5%</b>	11.4%
$P_{\text{anual}} = ]400-700]$ mm	RDI		8.4%	3.7%
<b>CLICOM ID</b>	15151	SPEI	3.4%	2.1%
<b>Meses que pasan Test de Normalidad</b>	may, jun, jul, sep, oct	SPI	8.7%	13.0%
		<b>ZI</b>	5.7%	<b>1.8%</b>

Pixel ID	981	Índice	Error Estándar FDN	Error Estándar FDG
<b>Nombre de estación</b>	CPI		5.6%	3.1%
Presas Valle de Bravo	PNI		3.5%	1.8%
<b>Zona</b>	3	EDI	4.9%	7.7%
$P_{\text{anual}} > 1,000$ mm	RDI		8.7%	8.9%
<b>CLICOM ID</b>	15130	<b>SPEI</b>	<b>2.1%</b>	<b>0.8%</b>
<b>Meses que pasan Test de Normalidad</b>	sep, oct	SPI	10.0%	13.5%
		ZI	5.7%	2.9%



Pixel ID	2599	Índice	Error Estándar FDN	Error Estándar FDG
<b>Nombre de estación</b>	CPI		3.4%	<b>0.3%</b>
Lago Nabor Carrillo	PNI		7.5%	11.7%
<b>Zona</b>	1	<b>EDI</b>	<b>0.8%</b>	6.0%
$P_{\text{anual}} = ]400-700]$ mm	RDI		7.4%	4.4%
<b>CLICOM ID</b>	15383	SPEI	3.9%	6.1%
<b>Meses que pasan Test de Normalidad</b>	may, jun, jul, aug, sep	SPI	6.3%	1.6%
		ZI	5.9%	4.2%

Pixel ID	774	Índice	Error Estándar FDN	Error Estándar FDG
<b>Nombre de estación</b>	CPI		4.8%	<b>6.4%</b>
San Pedro Limón	PNI		1.6%	8.7%
<b>Zona</b>	3	<b>EDI</b>	<b>0.5%</b>	10.7%
$P_{\text{anual}} > 1,000$ mm	RDI		5.9%	15.9%
<b>CLICOM ID</b>	15218	SPEI	1.7%	19.5%
<b>Meses que pasan Test de Normalidad</b>	may, jun, aug, oct	SPI	4.4%	8.4%
		ZI	5.9%	20.0%

Pixel ID	1488	Índice	Error Estándar FDN	Error Estándar FDG
<b>Nombre de estación</b>	CPI		8.2%	6.1%
Nevado de Toluca	PNI		2.6%	1.4%
<b>Zona</b>	2	<b>EDI</b>	<b>1.0%</b>	5.1%
$P_{\text{anual}} = ]700-1,000]$ mm	RDI		8.9%	5.3%
<b>CLICOM ID</b>	15062	<b>SPEI</b>	4.3%	<b>5.0%</b>
<b>Meses que pasan Test de Normalidad</b>	may, jun, jul, oct	SPI	10.3%	9.8%
		ZI	5.8%	5.5%

**Figura 8.** Resultados Caso I: error estándar (%) de índices de sequía meteorológica para la serie original 50 años.

Los datos resaltados en color verde son los mejores índices para FDN y FDG en cada sitio (con el menor error estándar).

## Discusión

Como se esperaba, las longitudes mayores de datos se aproximaron más al comportamiento de la serie de mil años, independientemente de la función de distribución, tal como se mostró en la Figura 4 para el índice EDI. Esto mismo fue encontrado en el trabajo de Mahmoudi *et al.* (2019), donde EDI tuvo mejores resultados a nivel mensual al aumentar la longitud de los datos. El índice SPI con FDG mostró una alta sensibilidad para longitudes de datos de 10 y 20 años, a diferencia de las otras longitudes de registro. Esto coincide con los resultados de diversos autores, como Keyantash y Dracup (2002), y Mahmoudi *et al.* (2019), quienes encontraron en sus estudios que el SPI es un buen índice de sequía solo con longitudes de registro mayores de 20 años.

Por otro lado, en el presente caso de estudio se detectó que los índices PNI y CPI no son sensibles a cálculos con diferente longitud de registro, lo mismo que Penalba y Rivera (2015) concluyeron en su estudio de 2015. De igual forma, este trabajo mostró que los índices RDI y SPEI perdieron sensibilidad a partir de 20 años de tamaño de muestra. Con base en los hallazgos de diferentes trabajos presentados por Stagge, Tallaksen, Gudmundsson, Van Loon y Stahl (2015); Peña-Gallardo, Gámiz-Fortis, Castro-Díez y Esteban-Parra (2016); Castillo-Castillo, Ibáñez-Castillo, Valdés, Arteaga-Ramírez y Vázquez-Peña (2017), y Vicente-Serrano *et al.* (2012), los resultados de este estudio coinciden con que SPEI es uno de los mejores índices de sequía para longitudes de

registro mayores a 20 años. Los resultados de este trabajo concuerdan con Link *et al.* (2020), quienes destacan que para una buena estimación de la sequía, mientras más largas sean las series de datos climatológicos de entrada, los errores de estimación de los índices serán menores.

Además, para la estimación de la sequía con SPI, Stagge *et al.* (2015) llegaron a la conclusión de que la FDG ofrece mejores estimaciones que las obtenidas con una FDN. Sin embargo, en este trabajo sucedió lo contrario. Una posible causa puede ser que las condiciones pluviométricas y geográficas fueron diferentes en ambos estudios. No obstante, la diferencia de errores entre ambas funciones FDN y FDG puede considerarse no significativa, ya que fueron de orden del 5 a 10 %.

Cabe resaltar que ninguno de los estudios previos ha proporcionado un árbol de decisiones como apoyo a los usuarios que realicen análisis de sequía meteorológica. Esta herramienta podrá orientar sobre la selección del índice en función del error de estimación, longitud de las variables de entrada y precipitación anual en la zona de estudio, por lo que estos resultados se consideran de gran utilidad para la comunidad científica y operativa en relación con el análisis probabilístico del fenómeno de la sequía en una cuenca o región.

## Conclusiones

De acuerdo con el proceso metodológico propuesto para cuantificar la sensibilidad de siete índices de sequía meteorológica, se concluye que los índices CPI, PNI, RDI, SPI y SPEI son poco sensibles al tamaño de longitud de registros de datos de entrada. De manera específica, CPI, PNI, RDI y SPI dejan de ser sensibles con longitudes de registro desde 20 años, y SPEI a partir de 10 años. Por otra parte, los índices EDI y ZI son muy

sensibles a longitudes menores de datos para su estimación, pues se requieren de periodos de registro mayores a 30 y 20 años, respectivamente, para tener buenos niveles de certeza. Asimismo, el error de los índices fue menor cuando se usó una FDN para generación de series sintéticas diarias de  $P$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$ . De igual forma, si se usan más variables meteorológicas en la estimación de sequías, los errores en promedio disminuyen entre un 13 y 40 % más, que si se usa solamente  $P$ . También, entre más  $P$  anual exista en la zona de estudio, los errores de estimación de sequía disminuyen entre un 6 y 10 % con los índices analizados. En lo que se refiere a las variables iniciales (precipitación y temperaturas), se recomienda hacer previamente análisis de normalidad a los datos diarios antes de generar series sintéticas, y utilizar de forma adecuada una FDN o FDG de acuerdo con el comportamiento de los datos. Se encontró que las series con datos diferentes de cero siguen más una FDN y cuando predominen datos con cero, lo preferible es usar una FDG.

Dado que hasta ahora no se ha identificado ningún estudio previo que ofrezca un árbol de decisiones como herramienta de respaldo para selección de índices de sequía meteorológica, se considera que este trabajo sería de gran utilidad para la comunidad científica y operativa sobre análisis probabilístico de sequías. Sin embargo, la utilización del árbol de decisiones estará condicionada por las variables de entrada y longitud de las mismas, así como por la magnitud de la precipitación anual de la zona de estudio.

Con base en los hallazgos del presente trabajo, se encontraron aspectos para mejorar los procesos: 1) usar otros métodos para cálculo de evapotranspiración, como el de Penman-Monteith sugerido por la FAO o el método de Hargreaves-Samani debido a que el método de Thornthwaite es considerado un estimador limitado de la realidad

evaporativa; 2) utilizar funciones de distribución conjunta para modelar probabilísticamente la ocurrencia simultánea de componentes de la sequía para establecer relaciones con los índices de sequía; 3) replicar esta metodología para regímenes pluviométricos más secos o más húmedos para ampliar el nivel de certidumbre de los índices de sequía; 4) en caso de que la nueva extensión temporal de la información lo permita y se verifique la identificación de la condición de no estacionariedad, esta última deberá considerarse como un posible efecto del cambio climático. Por lo tanto, las series semilla de las variables de temperatura y precipitación deberán depurarse antes del proceso de generación de series sintéticas.

### Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por otorgar la beca de doctorado para realización de estudios de posgrado en el IITCA-UAEMex.

### Referencias

- Aburrea, J., & Cebrián, A. (2002). Distribución de la sequía más severa en un intervalo de tiempo dado. En: *El agua y el clima* (pp. 125-134). España: Publicaciones de la Sociedad Española de Climatología. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9123>
- Arrojo, A. (2008). Prevenir las sequías desde la planificación en perspectivas de cambio climático. *Revista Ambienta*, (78), 34-40.
- Bayazit, M., & Önöz, B. (2005). Probabilities and return periods of multisite droughts. *Hidrological Sciences-Journal-Des Sciences Hydrologiques*, 50(4), 605-615. DOI: 10.1623/hysj.2005.50.4.605

- Bayissa, Y. A., Moges, S. A., Xuan, Y., Van Andel, S. J., Maskey, S., Solomatine, D. P., Van Griensven, A., & Tadesse, T. (2015). Spatio-temporal assessment of meteorological drought under the influence of varying record length: The case of Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 60(11), 1927-1942. DOI: 10.1080/02626667.2015.1032291
- Bhalme, H. N., & Mooley, D. A. (1980). Large-scale drought/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108, 1179-1211. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<1197:LSDAMC>2.0.CO;2
- Birkel, D. C. (2006). Sequía hidrológica en Costa Rica ¿Se han vuelto más severas y frecuentes en los últimos años? *Revista Reflexiones*, 85(1-2), 107-116.
- Bordi, I., & Sutera, A. (2002). An analysis of drought in Italy in the last fifty years. *Società Italiana Di Fisica. Il Nuovo Cimento*, 25, 185-206.
- Byun, H., & Wilhite, D. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2
- Campos-Aranda, D. F. (2007). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. San Luis Potosí, México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B., & Rossi, G. (2005). *Stochastic forecasting of standardized precipitation index*. XXXI IAHR Congress (pp. 3252-3260), Seoul, Korea.

- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 35-52. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-01-03
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Applied hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Inc.
- Crespo, P. G. (2006). *Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biósfera mexicana*. Montecillo, México: Colegio de Posgraduados.
- Da Silva, B. L. G., Silva, B. C. P., Póvoas, C. E., & Ramos, A. (2023). Estimativa da evapotranspiração de referência por três métodos, para a região de Ilhéus/BA. *Research, Society and Development*, 12(4), e7812440936. DOI: 10.33448/rsd-v12i4.40936
- Escalante, S., & Reyes, C. L. (2005). *Análisis de sequías. Volumen I y volumen II*. Ciudad de México, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fernández, H. W., & Buscemi, N. H. (2000). Análisis y caracterización de sequías hidrológicas en el Centro Oeste de Argentina. *Proceedings of the XVIII Congreso Nacional del Agua (Conagua)*. Santiago del Estero, Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, Termas de Río Hondo.
- Fernández-Larrañaga, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería del Agua*, 4(4), 37-46. DOI:10.4995/ia.1997.2734
- Gibbs, W. J., & Maher, J. V. (1967). Rainfall deciles as drought indicators. In: *Bureau of Meteorology Bulletin 48*. Melbourne, Australia: Bureau of Meteorology.

- González, P. J. (2005). *Caracterización estocástica de la realización espacio-temporal de eventos hidrológicos extremos de sequías* (tesis de grado). Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Hallack-Alegria, M., & Watkins, D. J. (2006). Annual and warm season drought intensity-duration-frequency: Analysis of Sonora, México. *Journal of Climate*, 20(9), 1-44. DOI: 10.1175/JCLI4101.1
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *INEGI*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/>
- Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *American Meteorological Society*, 83(8), 1167-1180. DOI: 10.1175/1520-0477-83.8.1167
- Link, R., Wild, T. B., Snyder, A. C., Hejazi, M. I., & Vernon, C. R. (2020). 100 years of data is not enough to establish reliable drought thresholds. *Journal of Hydrology X*, 7, 100052. DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100052
- Linsley, R., Kholer, M., & Paulhus, J. L. H. (1988). *Hidrología para ingenieros* (2a ed.). Cali, Colombia: McGraw-Hill.
- Mahmoudi, P., Rigi, A., & Kamak, M. M. (2019). Evaluating the sensitivity of precipitation-based drought indices to different lengths of record. *Journal of Hydrology*, 579, 124181. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124181
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, January 17-22, Anaheim, California, USA.

- Moneo, M. (2008). *Drought and climate change impacts on water resources: Management alternatives* (tesis doctoral). Valencia, España: Universidad Politécnica de Madrid. DOI: 10.20868/UPM.thesis.1222
- Nadarajah, S., & Gupta, A. K. (2006). Distribución Gamma bivariada de Cherian como un modelo para datos de sequía. *Revista Agrociencia*, 40(4), 483-490.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2016). Programa de gestión integrada de sequías. Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. En: Svoboda, M., & Fuchs, B. A. (eds.), *Manual de indicadores e índices de sequía*. Ginebra, Suiza: OMM. Recuperado de [https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP\\_Manual-de-indicadores\\_2016.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016.pdf)
- Peña-Gallardo, M., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2016). Análisis comparativo de índices de sequía en Andalucía para el periodo 1901-2012. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 67-88. DOI: 10.18172/cig.2946
- Penalba, O. C., & Rivera, J. A. (2015). Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. *Centro Argentino de Meteorólogos*, 40(2), 33-57.
- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2004). *La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo*. Recuperado de [http://www.undp.org/content/undp/es/home/librarypage/crisis-prevention-and-recovery/reduction\\_risques\\_catastrophes.html](http://www.undp.org/content/undp/es/home/librarypage/crisis-prevention-and-recovery/reduction_risques_catastrophes.html)

- Ross, S. M. (1985). *Introduction to probability models* (3<sup>rd</sup> ed.). Cambridge, USA: Academic Press.
- Sirdaş, S., & Şen, Z. (2003). Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 48(5), 809-820. DOI: 10.1623/hysj.48.5.809.51458
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2012). *Normales climatológicas por estación*. Recuperado de [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42&Itemid=75](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35, 4027-4040. DOI: 10.1002/joc.4267
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11.
- Vicente-Serrano, S., Berguería, S., & López-Moreno, J. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1
- Vicente-Serrano, S., Berguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J., López-Moreno, J., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27. DOI: 10.1175/2012EI000434.1

- Wu, H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Svoboda, M. D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Clitatology*, 25, 505-520. DOI: 10.1002/joc.1142
- Yahiaoui, A., Tauaïba, B., & Bouvier, C. (2009). Frequency analysis of the hydrological drought regime. Case of oued Mina catchment in western of Algeria. *Revue Nature et Technologie*, 1, 13-15.
- Yevjevich, V. M. (1972). *Probability and statistics in hydrology* (pp. 126-133). Fort Collins, USA: Water Resources Publications.

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-10

Artículos

**Implementación de un sistema de bombeo utilizando una turbina hidráulica sin consumo de energía eléctrica**  
**Implementation of a pumping system using a hydraulic turbine without electric power consumption**

Camilo Andrés Tovar-Trujillo<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6860-9078>

Juan Gonzalo Ardila-Marín<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4461-7195>

Jean Carlos Acosta-Vargas<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5266-1556>

<sup>1</sup>Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia, [ca.andres\\_08@hotmail.com](mailto:ca.andres_08@hotmail.com)

<sup>2</sup>Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia, [juan.ardila@usco.edu.co](mailto:juan.ardila@usco.edu.co)

<sup>3</sup>Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia, [jean.acosta@usco.edu.co](mailto:jean.acosta@usco.edu.co)

Autor para correspondencia: Jean Carlos Acosta-Vargas, [jean.acosta@usco.edu.co](mailto:jean.acosta@usco.edu.co)



## Resumen

Debido a la creciente demanda alimenticia en Colombia y el mundo es urgente mecanizar el campo e implementar nuevas tecnologías en el sector agrícola para mejorar la producción. El Centro Tecnológico de Ingeniería GEOMAAC implementó un sistema de bombeo con energía hidráulica en la finca La Esperanza (Rivera-Huila) para suplir la necesidad hídrica en épocas de estiaje. La bomba transporta 70 m<sup>3</sup>/día de agua a un reservorio a 32.32 metros de altura para su almacenamiento y distribución, lo que permite obtener suficiente forraje para la ganadería. Se compararon dos sistemas de bombeo: la bomba ZM Maxxi y una electrobomba convencional. Aunque la ZM Maxxi tiene un mayor costo de instalación, la electrobomba tiene un costo anual de consumo de energía eléctrica de 12 146 112 COP (\$USD 2 958). El uso de la ZM Maxxi, que utiliza energía renovable, permite ahorrar este monto anualmente. Tras los estudios económicos y de diseño, se seleccionó la ZM Maxxi y se procedió a su instalación. La bomba entrega 68 570 litros de agua diarios, que benefician la parte alta de la finca y permiten recuperar la inversión a mediano plazo.

**Palabras clave:** hidráulica, bomba alternativa, energías renovables, sistemas de riego, bombeo.

## Abstract

Due to the increasing food demand in Colombia and worldwide, it is imperative to mechanize the agricultural sector and implement new technologies to improve production. The GEOMAAC Engineering Technology Centre has implemented a hydraulic-powered pumping system at La Esperanza farm (Rivera-Huila) to address the water needs

during dry seasons. The pump transports 70 m<sup>3</sup>/day of water to a reservoir located at 32.32 meters in height for storage and distribution, ensuring sufficient forage for livestock. Two pumping systems were compared: The ZM Maxxi pump and a conventional electric pump. Although the ZM Maxxi has a higher installation cost, the conventional electric pump incurs an annual electricity consumption cost of 12 146 112 COP (\$USD 2 958). The use of the ZM Maxxi, which utilises renewable energy, allows for annual savings of this amount. After conducting economic and design studies, the ZM Maxxi was selected, and its installation was carried out. The pump delivers 68 570 litres of water daily, benefiting the higher areas of La Esperanza farm and allowing the investment to be recouped in the medium term

**Keywords:** Hydraulics, alternative pump, renewable energies, irrigation systems, pumping.

Recibido: 14/10/2024

Aceptado: 14/03/2025

Publicado *ahead of print*: 31/03/2025

Versión final: 01/11/2025

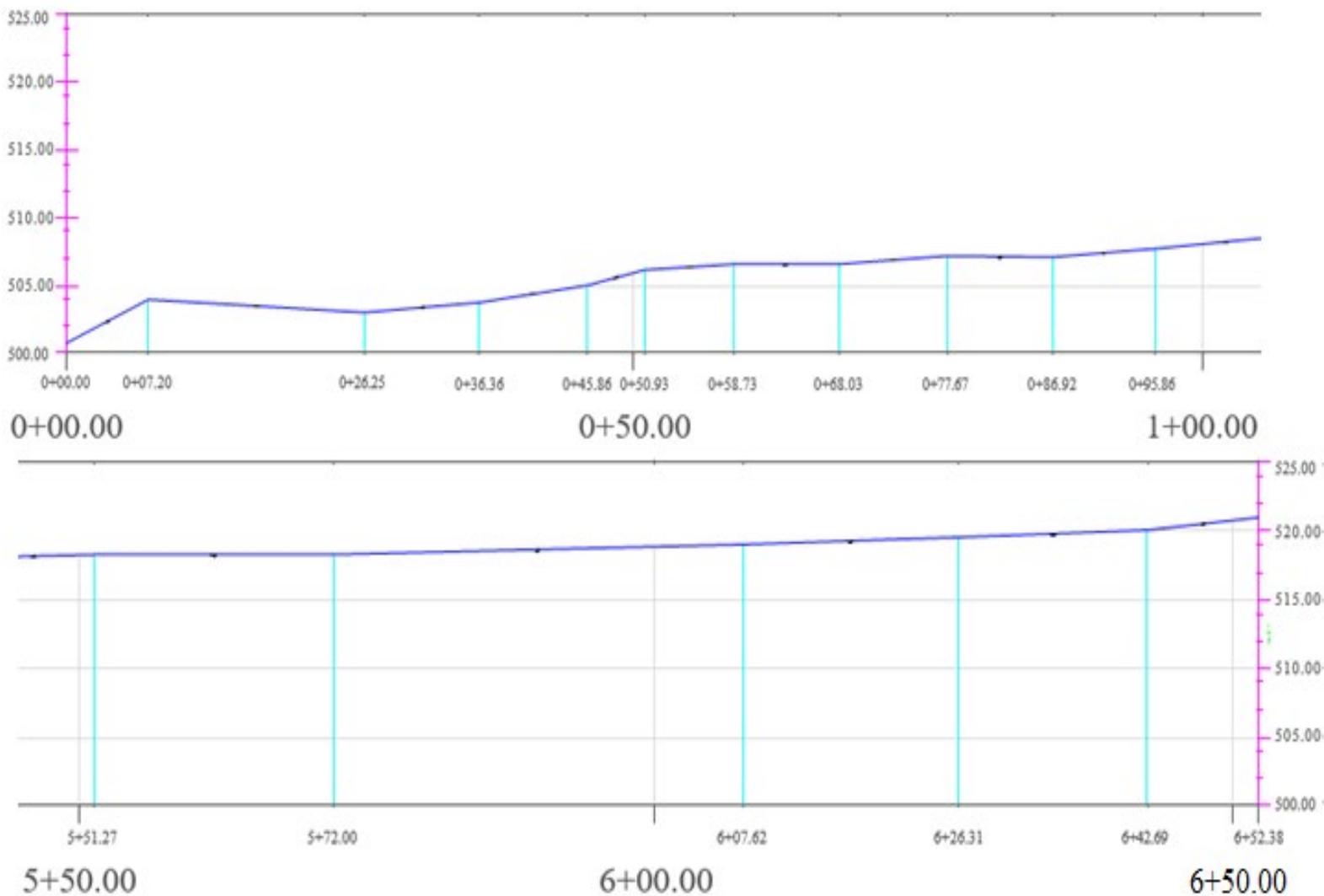
## Introducción

La agricultura ya no se limita a transferir recursos para el fomento de la industrialización por lo que se convierte en un sector capaz de desempeñar funciones importantes para el desarrollo económico (Bermeo-Mayancela, 2022). En Colombia, el sector agropecuario genera cerca del 20 % de empleo en el país, y casi el 50 % en sector rural

(Leibovich & Estrada, 2008). En 2024, se registraron aproximadamente 3.3 millones de trabajadores en el sector agropecuario colombiano (UPRA, 2024). Un plan integrado dirigido al sector deberá tener en cuenta la relación entre la mecanización agrícola y los recursos naturales, donde la máquina interactúa con cada recurso y, a la vez, los recursos entre sí, donde la contaminación de uno afecta al otro (Díaz-Rodríguez, & Pérez-Guerrero, 2007). La tecnología es aplicable en las áreas de agricultura, lo que permite la disminución de tiempo y costes de las diferentes labores agrícolas (Santos, 2018); los productores deben estar abiertos a buenas prácticas agronómicas, tecnológicas y de mecanización (Gras & Hernández, 2016). Sin embargo, no se ha llegado a una utilización total de la maquinaria debido sobre todo al alto valor de los equipos, pues casi todos son importados (Polanco-Puerta, 2007).

En su gran mayoría, en Colombia se capta y distribuye el agua por efecto de la gravedad; en muy pocos casos en el riego se presenta la captación y distribución por medio de bombeo, es decir, que se cuente con un sistema de bombas y un consumo energético para su funcionamiento (Palacio-Castañeda, 2010). En La Esperanza (ubicado en el municipio de Rivera-Huila), perteneciente a la subcuenca de Río Frío, la mayor demanda existente son los cultivos; en orden descendente: cacao, pastos manejados, cultivos transitorios, uso doméstico, cultivos permanentes y el uso pecuario. Para los periodos de junio, julio y agosto no existe agua disponible para satisfacer la demanda del recurso. La finca La Esperanza carece de alternativas para el mejoramiento de sus sistemas de riego para sus cultivos de forraje para ganado, pues en épocas de poca lluvia, el alimento es deficiente para estos animales y en consecuencia los productos derivados de dichos animales no tienen el mismo rendimiento. Dentro de la finca, en su parte alta, hay un reservorio que es alimentado

por afluentes y piscícolas que están muy próximos al predio, que es aprovechada por los cultivos para ganadería, dado que la agricultura de la Finca, en su mayor parte, se encuentra en las partes más bajas de la zona, donde se dispone de una represa que es alimentada por el Río Frío y mantiene un buen nivel permanente. En la Figura 1 se muestra el perfil longitudinal, que va desde la presa hasta el reservorio; tiene una diferencia de altura de 22 metros y una distancia de 652 metros.



**Figura 1.** Perfil longitudinal del terreno (tramo de 0 a 100 m y de 550 a 652 m).

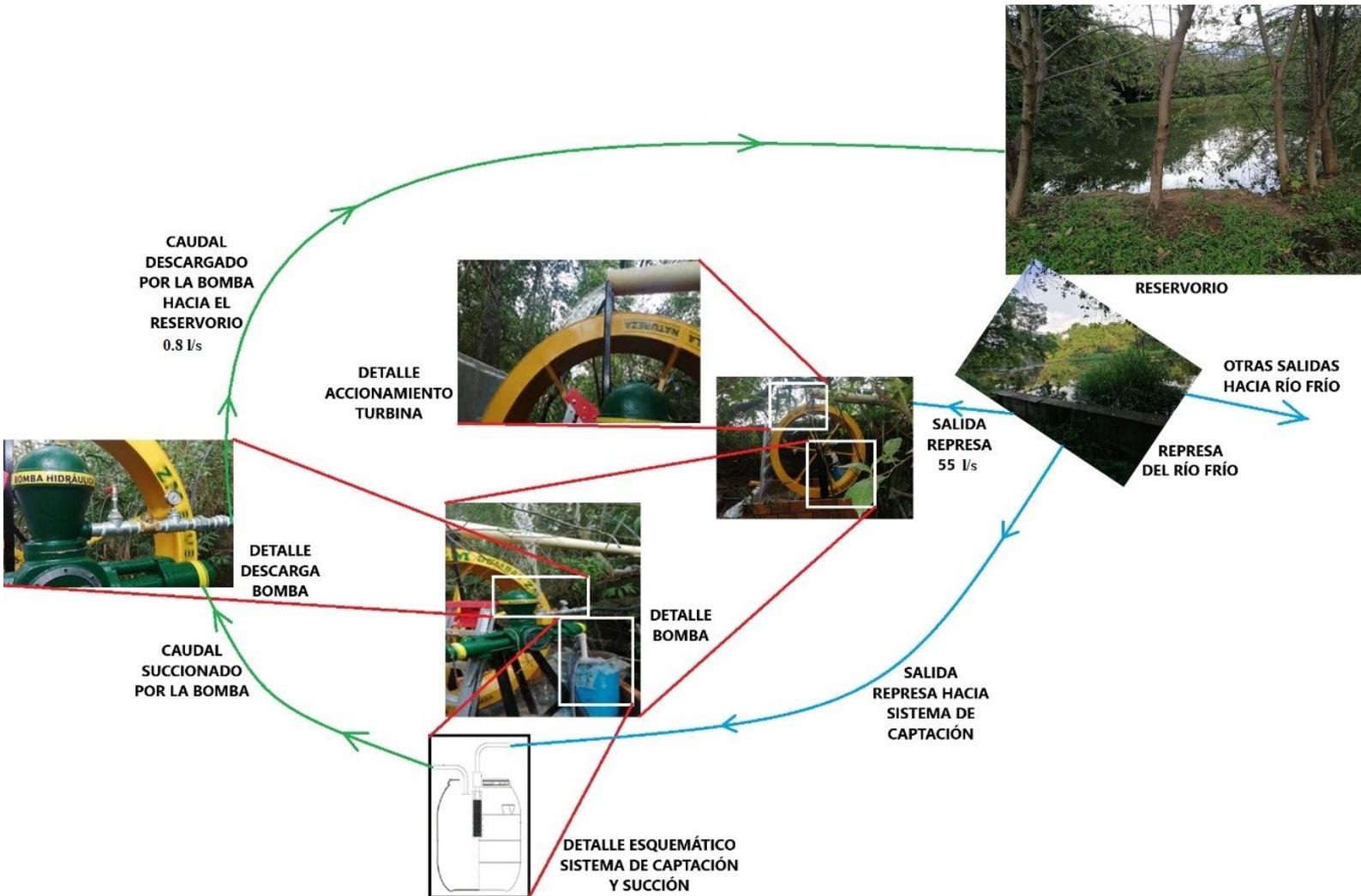
El aprovechamiento de las aguas de la parte alta y el uso eficiente de ellas es de gran importancia para la producción en el cultivo de forraje para ganado, pero en época seca el reservorio no mantiene el nivel adecuado para el riego en la zona. Partiendo de estos hechos, el problema principal era el bajo aprovechamiento de la parte alta del predio debido a que, en los meses secos, no había suficiente recurso hídrico para la producción de forraje.

En el Centro Tecnológico de Ingeniería GEOMAAC S.A.S. surgió este proyecto con el objetivo de implementar un sistema bombeo sin consumo de energía eléctrica para la producción de forraje para ganado en la finca La Esperanza, para lo cual fue necesario calcular y seleccionar una bomba hidráulica ZM® apropiada a las condiciones del sitio, a fin de proceder a su instalación, verificar la puesta en marcha del sistema implementado, y demostrar la ventaja que tiene este sistema comparado con otros. La selección de las marcas ZM® para bombeo a partir de energía hidráulica, y Pedrollo® para bombeo convencional con energía eléctrica, busca compararlos, y resulta adecuada y necesaria para el estudio debido a que ambos fabricantes son accesibles en el mercado local, lo que facilita su implementación y mantenimiento. Limitar el análisis a solo dos fabricantes con tecnologías marcadamente diferentes asegura una metodología enfocada y evita diluir los resultados en una comparación demasiado amplia; ello permite profundizar en el análisis de cada sistema, que destaca las ventajas y limitaciones de cada uno dentro del contexto agrícola.

## Propósito del proyecto

El proyecto buscó la implementación de un sistema de bombeo sin consumo de energía eléctrica para la producción de forraje para ganado en la finca La Esperanza. Para esto, se propuso calcular y seleccionar la bomba hidráulica ZM® apropiada a las condiciones del sitio, verificar la puesta en marcha del sistema implementado y demostrar la ventaja que tiene ese sistema comparado con una alternativa convencional que sí consumiera energía eléctrica.

En La Esperanza, en épocas de sequía, la producción de forraje para el ganado era mínima; bajo la implementación de este sistema de bombeo hidráulico, que aprovecha la energía hidráulica del caudal saliente de la represa para bombear agua a las zonas superiores sin consumo de energía eléctrica, se logró mejorar la generación agrícola del cultivo, que implicará un aumento en cuanto a rendimientos y longevidad del cultivo; además, incrementará la calidad de vida de los habitantes de la finca. En la Figura 2 se presenta un esquema global del sistema desarrollado en este proyecto, con el que se busca orientar al lector para mejorar su comprensión de las secciones que a continuación describen la metodología de diseño y comparación entre las dos tecnologías descritas, y los resultados y discusión que llevan a las conclusiones del presente estudio.



**Figura 2.** Esquema global del proyecto.

## Materiales y métodos

### Especificación del problema

La finca La Esperanza se ubica en la vereda Río Frío a unos diez minutos de la ciudad de Neiva, municipio de Rivera, subcuenca de Río Frío, que cubre un área de 62 km<sup>2</sup> aproximadamente, que representa el 16.7 % del área del municipio de Rivera. En la Figura 3 se aprecia la ubicación del

municipio. Entre los principales ríos están el Río Negro, Río Blanco y la Dinda, que abastecen los acueductos del casco urbano de Rivera y las veredas del Salado, Alto Guadual y Llanitos, así como a la zona rural de las veredas Termopilas, Alto Pedregal y parte del Bajo Pedregal. Según la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), la mayor demanda existente son los cultivos, pero para los periodos de junio, julio y agosto no existe agua disponible para satisfacer la demanda.



**Figura 3.** Ubicación del municipio de Rivera (arriba); finca La Esperanza y ubicación del proyecto (abajo).

De inicio se hizo el reconocimiento del lugar, con el fin de tener una idea de su ubicación, dimensión y su distribución. El predio es usado para distintas labores de campo, como la ganadería principalmente, crianza equina y para el cultivo de maíz. La finca cuenta también con grandes extensiones boscosas y a través de ella pasa el Río Frío, que abastece de agua para las distintas labores agrícolas de la zona. Mediante el *software* Google Earth y las indicaciones dadas por los propietarios del predio, se logró obtener la ubicación exacta de la zona, además de sus limitaciones para después hacer el levantamiento topográfico.

En la Figura 3 se demarcan los límites de la finca y se define, en el punto denotado como "Bomba Pelton", la ubicación de la salida de la represa que provee un caudal de 55 l/s, que accionará la rueda hidráulica para bombear el recurso hídrico hacia el "Reservorio", que es alimentado por afluentes y piscícolas que están muy próximos al predio, pero que en época seca no mantiene el nivel adecuado para el riego en la zona. La Figura 3 muestra el trazado de la línea de conducción de agua desde la represa de la parte baja hasta el reservorio. La topografía del terreno se tomó con la ayuda de un dron EVO II Pro 6K suministrado por la empresa Huésped. Se consiguió crear un mapa de alta resolución con los detalles cartográficos y con ello se corroboró la información suministrada. El mapa elaborado puede apreciarse en la Figura 4. Se identificaron con exactitud las zonas para el cultivo del maíz, zonas boscosas, potreros, reservorio, represa, ubicación de la finca e incluso vías de acceso. La información más relevante se reporta en la Tabla 1. Al obtener toda la información de campo gracias al levantamiento, se procedió con los trabajos de digitalización y procesamientos de datos. Con el apoyo del *software* ArcGIS® se realizaron los mapas de planimetría, curvas de nivel, modelo de elevación digital y un ortomosaico del predio.

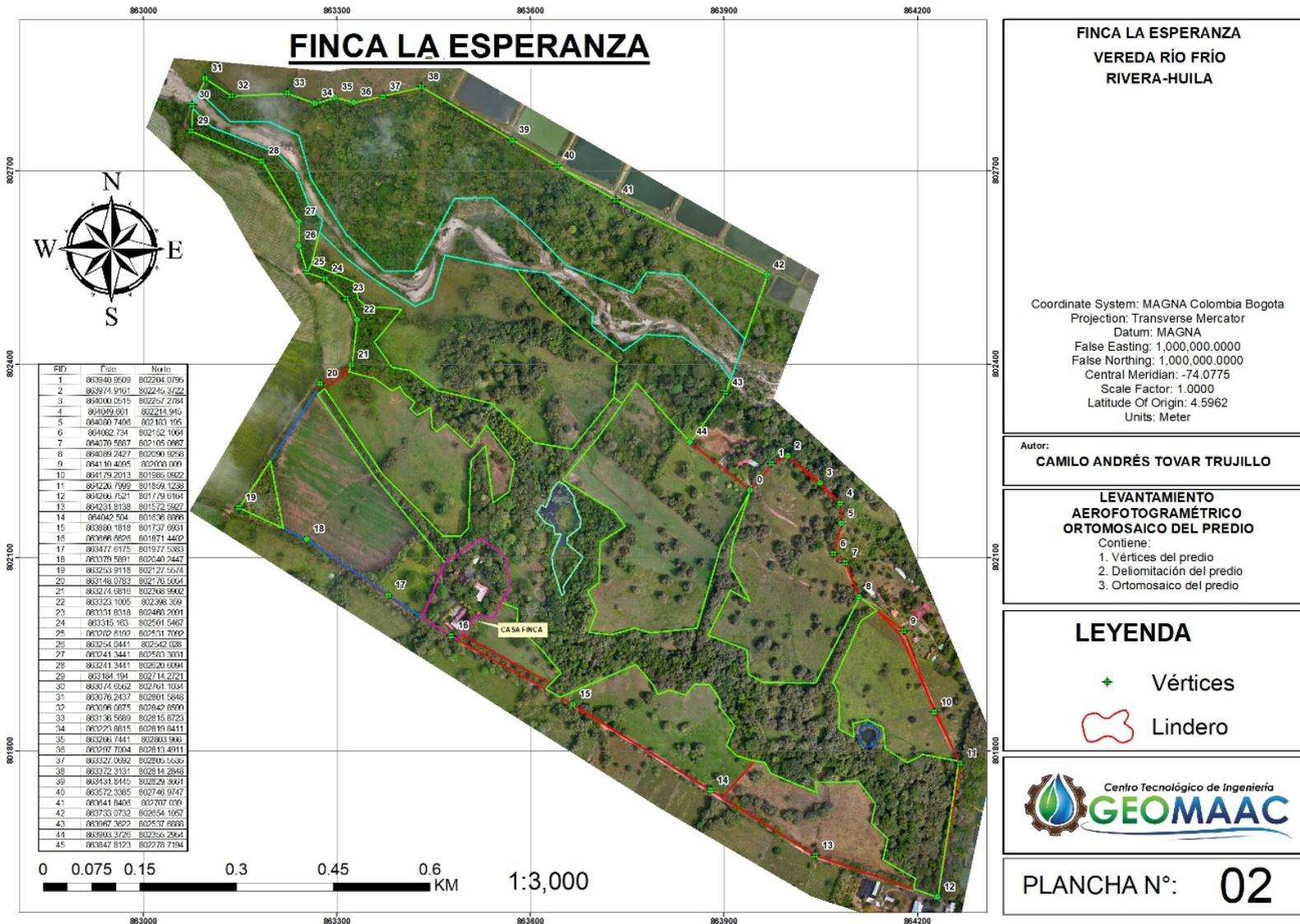


Figura 4. Mapa detallado de la finca La Esperanza.

Tabla 1. Datos topográficos y cartográficos relevantes de la finca La Esperanza.

Coordenadas		Altura máxima del predio	Altura mínima del predio
86.3503,75 E	80.2051,30 N	611 msnm*	468 msnm

\*metros sobre el nivel del mar.



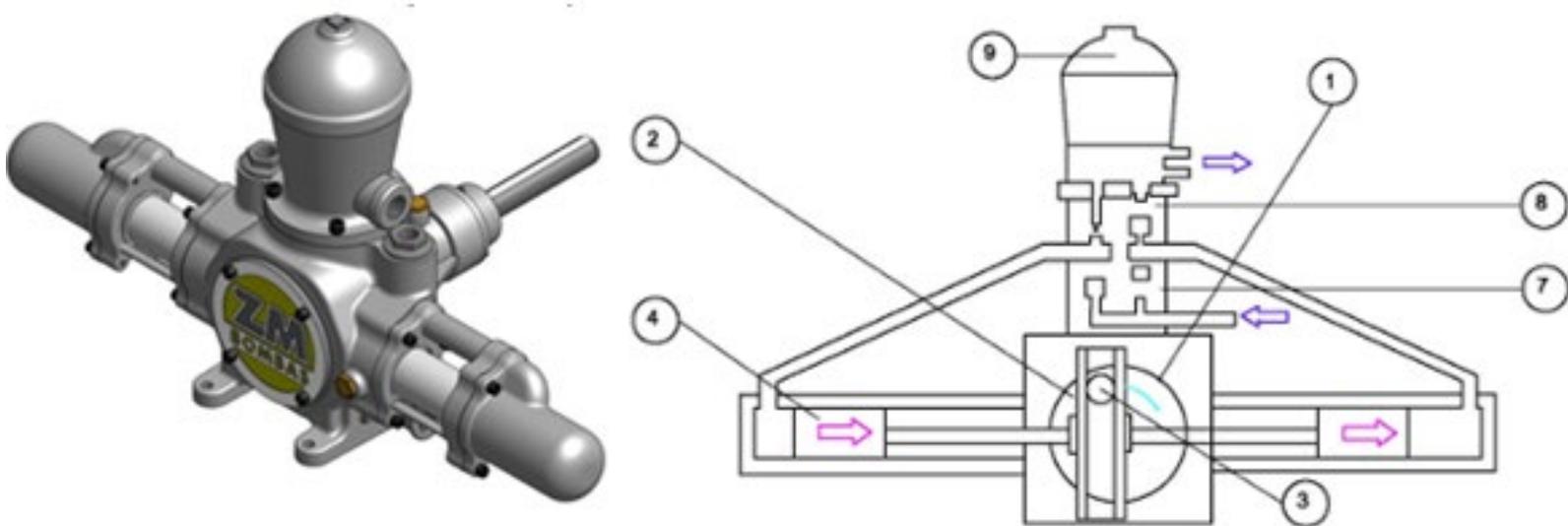
## Bomba hidráulica ZM

El trabajo que se realiza por medio de la bomba hidráulica ZM utiliza la energía cinética y potencial de un caudal del agua que mueve una turbina (rueda) para aprovechar esa energía (Figura 5). El movimiento o energía es trasladado a un eje, que hace girar una bomba, la cual absorbe el agua para luego ser impulsada. No requiere de energía convencional como electricidad o derivados del petróleo (Guaña-Quilumba & Quishpe-Sacancela, 2018).



**Figura 5.** Bomba ZM Maxxi. Fuente: ZM Bombas (2020).

La bomba ZM Maxxi es una bomba alternativa de doble efecto que aprovecha la energía hidráulica producida por el impulso del agua en los cajones de una rueda metálica, este peso del agua hace que la rueda gire y mediante el uso de un punto excéntrico (3) (Figura 6) en un disco metálico (1), se produce el movimiento de dos pistones (4), que en términos prácticos funcionan como jeringas succionando e impulsando el agua a través de las válvulas de retención (7 y 8), las que permiten el paso a la cápsula de aire o caballete (9), y de este a la tuberías de bombeo.

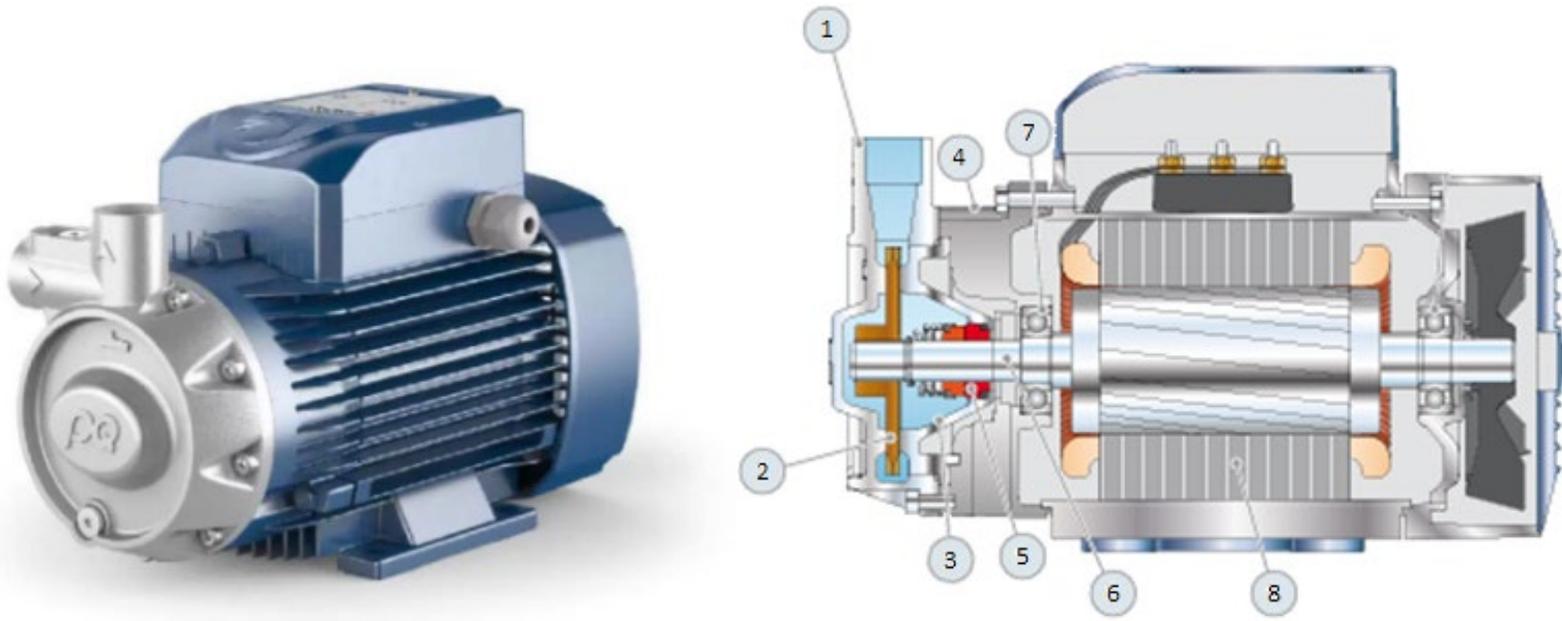


**Figura 6.** Corte transversal Bomba ZM Maxxi. Fuente: ZM Bombas (2020).

### Electrobomba con rodete periférico

Ahora se presenta la bomba periférica (Figura 7) como la alternativa a considerar en el presente proyecto, pues una de las metas es demostrar la viabilidad y conveniencia del uso de la bomba con fuente de energía

hidráulica; las electrobombas de rodete periférico son similares a las bombas centrífugas, con la diferencia de que en este tipo de bomba el líquido no ingresa al cuerpo axialmente sino periféricamente como la descarga (1); ya en el cuerpo es impulsado desde la entrada (succión) hasta la salida (descarga) por medio de los álabes del rodete (2) a velocidades muy altas dentro del canal anular (3), donde este gira tras realizar un recorrido de casi 360°. El cuerpo de la bomba está acoplado en dirección axial al motor eléctrico, pero el acople (4) aloja en su interior un sello (5) que impide el paso del fluido al motor, lo que evita cortocircuitos. El rodete recibe potencia mecánica del rotor del motor eléctrico a través del eje (6), que gira con suficiente libertad apoyándose en cojinetes de rodamientos rígidos de bolas (7) que están sellados y en su interior se encuentran lubricados con grasa. El rotor de jaula de ardilla y sus laminados giran por inducción electromagnética persiguiendo el campo magnético giratorio ocasionado en el devanado del estátor (8) por la corriente eléctrica que es alimentada por las borneras en la parte superior del motor de la electrobomba, y que se consume y determina el coste de operación que será analizado más adelante para realizar la comparación tecno-económica entre las dos tecnologías en el presente estudio.

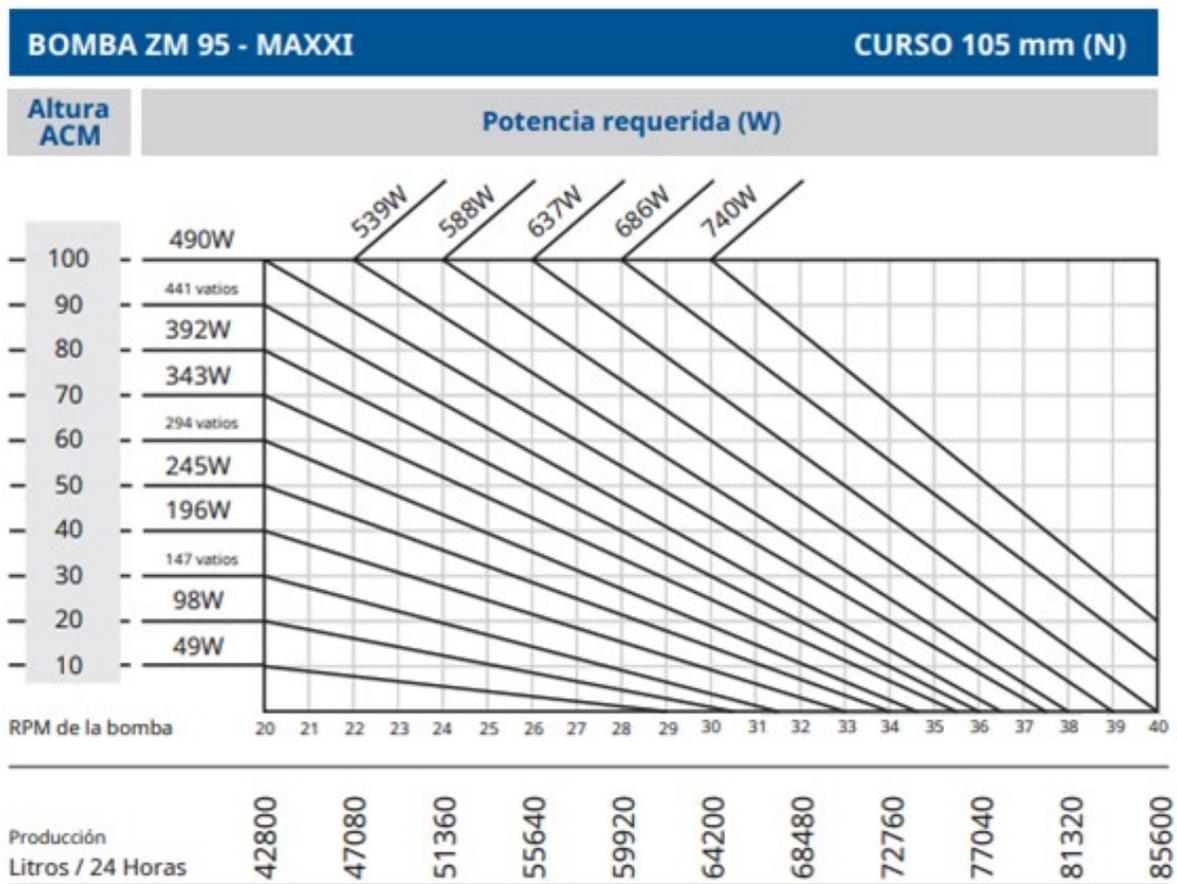


**Figura 7.** Electrobomba periférica Pedrollo® con corte transversal.  
Fuente: Pedrollo (2023).

## Selección de la bomba ZM

Para el cálculo y selección de la bomba ZM se requirió en primera medida establecer cuáles son las necesidades, pues con base en las necesidades se dimensionan el diámetro de la tubería, pérdidas y altura máxima de descarga. La diferencia de altura de 22 m y la distancia a la cual se debe llevar el agua es de 688 m, que se definieron por medio del levantamiento topográfico; además, el caudal que de 70 m<sup>3</sup>/día. Una vez definido lo anterior, se consultó el manual técnico del fabricante sugerido por la empresa. El modelo de la bomba se define a partir de la valoración de la altura y el caudal en el catálogo del fabricante, que se ajusten a las condiciones establecidas. De acuerdo con esto, ya elegido el modelo de la

bomba a usar, se procede a establecer el modo de regulación que mejor se ajuste a las condiciones del sistema de abastecimiento, es decir a la curva consigna que se muestra en la Figura 8. Teniendo clara la bomba a emplear, se dirigió a la tabla de diámetro y ancho de la rueda, que será la encargada del accionamiento de todo el sistema.



**Figura 8.** Curva consigna de bomba ZM 95 MAXXI. Fuente: ZM Bombas (2020).

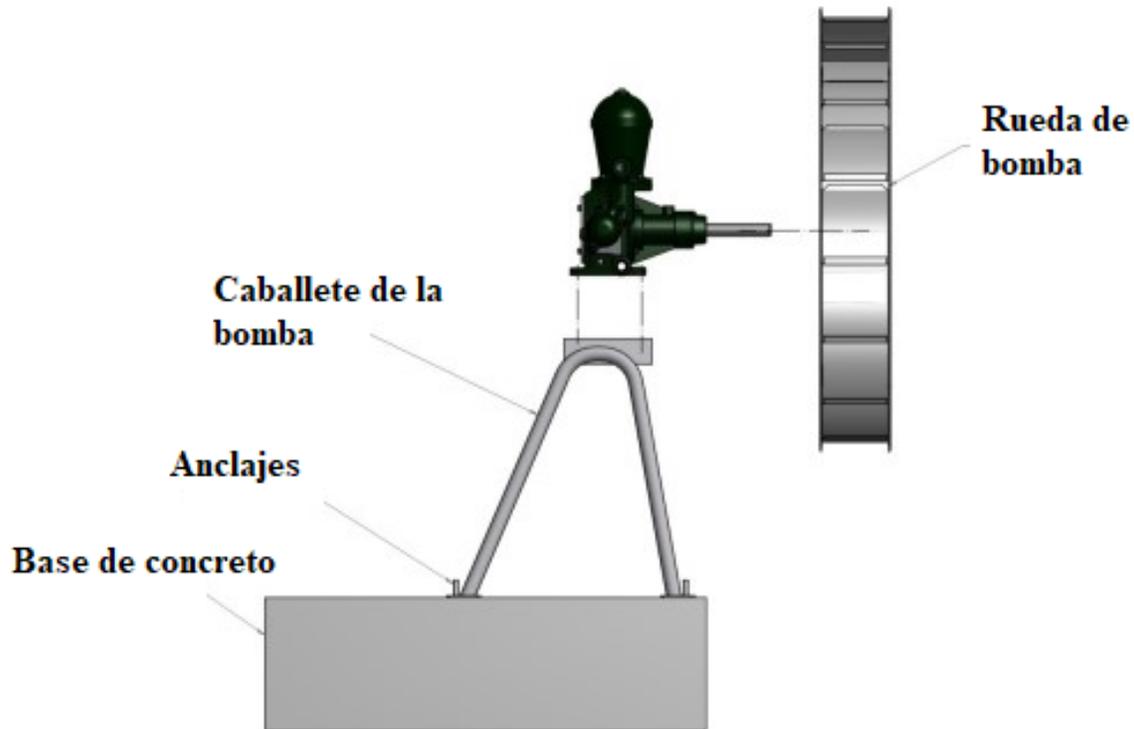
Después, con la ayuda del *software* ArcGIS®, se procedió con la elaboración del plano de trazado de la tubería de descarga (línea de

conducción), a fin de conocer por dónde se llevará la línea de conducción y su longitud exacta, que será importante tener claro a la hora de realizar los cálculos, instalación y elaboración del presupuesto. Para finalizar se realizó el presupuesto, que se dividió en seis capítulos, levantamiento aerofotogramétrico, adecuación del terreno, placa de concreto, red hidráulica, sistema de bombeo y costos indirectos.

## **Diseño, selección y montaje del conjunto con accesorios**

Para iniciar con la instalación del sistema se seleccionó un lugar que fuera de sencillo acceso, accesible captación de agua sobre la rueda y fácil succión de agua a ser bombeada; se adecuó el terreno con una limpieza del lugar, y remoción de todo tipo de vegetación y escombros que podrían interferir en la instalación y funcionamiento del sistema. Posteriormente fue necesario construir una placa de concreto para el soporte de todo el montaje. La Norma ACI351.3R-04 "Foundations for Dynamic Equipment", establece tipos de cimentaciones para maquinarias. En el caso de la aplicación actual, el tipo de estructura más adecuado es la cimentación tipo bloque (Arias, Olaya, & Ardila, 2021). El criterio utilizado para el dimensionamiento de la placa de hormigón es de la relación de masas, el cual indica que se propone una cimentación cuyo peso sea de 3 a 5 veces el peso de la maquinaria (Chávez-Schaw, 2014). La placa fue hecha en función de las dimensiones y el peso de la bomba, que es de unos 300 kg; la placa es de 3 x 3 m, con un espesor de 10 cm, que sería el equivalente a un volumen de 0.9 m<sup>3</sup> de concreto y tendría un peso aproximado de 2 100 kg. Una vez curado el concreto, se fijó el caballete

sobre la base de albañilería, la bomba sobre el caballete y finalmente la rueda sobre el eje de la bomba (Figura 9).



**Figura 9.** Recomendaciones básicas para el montaje del conjunto de bomba hidráulica ZM®. Fuente: ZM Bombas (2020).

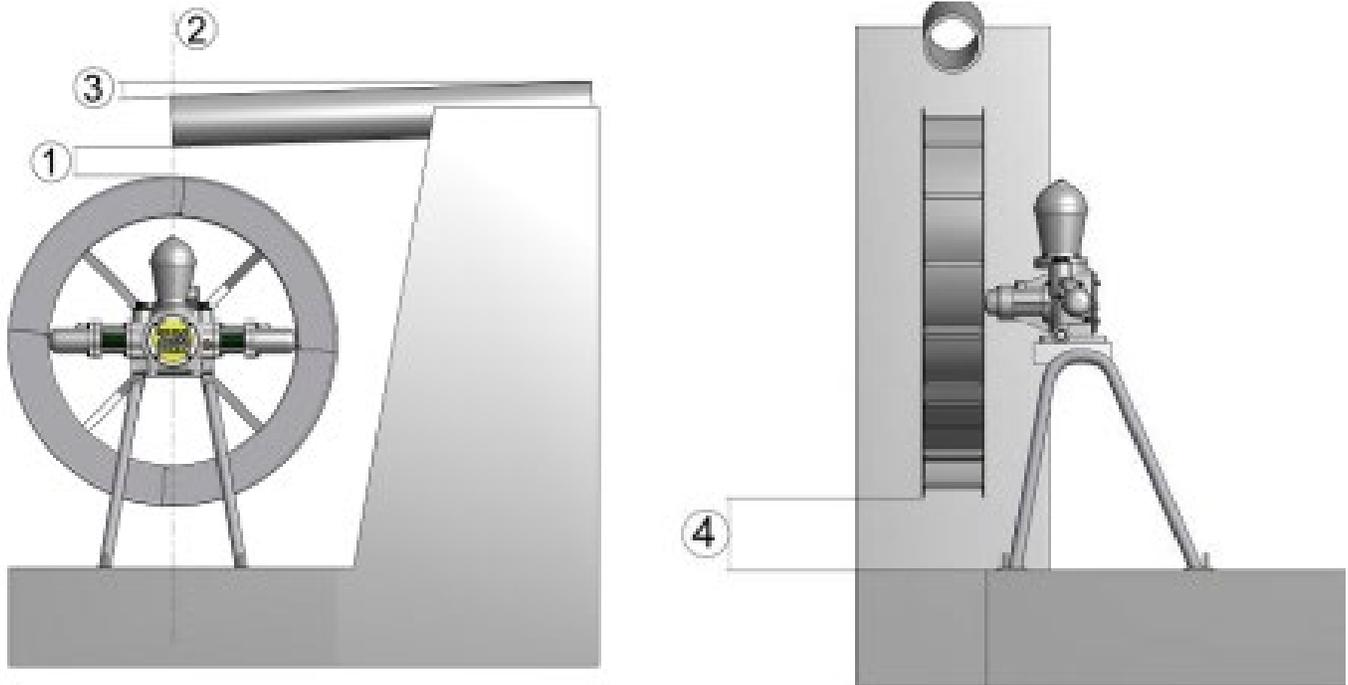
### Sistema de captación y succión de agua

Para el sistema de captación se colocó una manguera que lleva por gravedad el agua de la represa a un depósito; en este caso, un tambor plástico de un volumen de 200 litros, pues es la cantidad mínima requerida para un funcionamiento de succión adecuado. Como el agua a ser captada está por encima del nivel de la bomba, el tambor plástico se instaló a unos 50 cm por debajo del nivel de la bomba. Unas de las

consideraciones que se tuvieron en este punto fue la instalación de una malla a la entrada de la manguera de captación y de la tubería que descarga el agua para el accionamiento de la rueda debido a que la represa presenta un alto contenido de algas y demás materiales en suspensión. Esto, a fin de entregar una mejor calidad de agua al sistema y evitar taponamientos que pudieran perjudicar el funcionamiento y la vida útil del mismo.

### **Sistema de accionamiento de la rueda**

Para obtener un mayor potencial hidráulico fue necesario efectuar el sistema de alimentación de la rueda observando algunos puntos fundamentales recomendados por ZM Bombas (2020), como puede apreciarse en la Figura 10: (1) que la tubería de suministro o descarga de agua quedara situada a unos 10 cm por encima de la rueda y (2) el posicionamiento del tubo hasta, aproximadamente, el centro de la rueda (3), con una inclinación de 3 a 5 % de la longitud (4), y que la distancia de la rueda hasta la placa de concreto fuera de unos 10 cm.



**Figura 10.** Sistema de accionamiento bomba ZM. Fuente: ZM Bombas (2020).

### Sistema de descarga

Para la instalación de la tubería de descarga se fijó la bomba con la salida hacia donde se colocó la tubería; además se instaló un manómetro, una válvula de bola y una válvula de retención (válvula check) al inicio de la tubería de descarga, para retener el agua que está en la tubería, con el propósito de evitar un giro contrario de las hélices cuando no esté funcionando o se requiera hacer algún tipo de mantenimiento.

Como se determinó que la línea de descarga es de manguera de polietileno, se utilizó un diámetro mayor al arrojado en los cálculos (ver la sección de Resultados) al inicio de la tubería, en función de las enmiendas internas de la manguera que son de menor diámetro.

Una vez puesta la manguera hasta el reservorio, se verificó por medio de aforo que el caudal a ser bombeado llegara hasta su destino; una vez que se comprobó, se detuvo el sistema para finalizar el proceso de instalación y se enterró la manguera de conducción a unos 30 cm de profundidad aproximadamente, para que no interviniera con las labores agrícolas.

## Puesta en marcha

Previo a la puesta en punto del sistema, se hizo el cebado de la bomba, que consistió en introducir agua por la válvula de purga con el objetivo de sacar el aire en el interior de la bomba y de la línea de succión para una mejor eficacia al momento de bombear el agua y evitar la cavitación. Luego se verificó que la línea de captación no tuviera taponamiento debido a los materiales en suspensión y algas presentes en la represa, y que el depósito de agua (tambor plástico) se encontrara al nivel requerido para un óptimo funcionamiento de succión.

Una vez hecho lo anterior, se puso en marcha el sistema, dejando caer agua por la tubería de descarga encargada del accionamiento de la rueda de la bomba, constatando que el caudal que manejaba fuera el especificado en el manual de 55 l/s por medio de aforo; después se confirmó que la rueda girara a 33 revoluciones por minuto (rpm) y se finalizó comprobando el caudal entregado al reservorio por la línea de conducción, siendo de 0.81 l/s hallado mediante aforo volumétrico, el necesario para cumplir con los requerimientos hechos por el propietario de 70 m<sup>3</sup>/día.

## Costos de montaje del sistema

En la Tabla 2 se presenta el modelo de bomba hidráulica marca ZM Maxxi, que fue seleccionado en este proyecto, como se mostrará más adelante, con su caracterización.

**Tabla 2.** Características de la bomba hidráulica ZM 95Maxxi.

Modelo	Altura manométrica máx.	Caudal altura máx.	Altura manométrica mín.	Caudal altura mín.	Temperatura	Vida útil
ZM 95 Maxxi	130 m	85 600 l/día	10 m	42 800 l/día	0-60 °C	30 años

Fuente: ZM Bombas (2020).

En la Tabla 3 se presenta el modelo alternativo escogido para la comparación tecno-económica: la electrobomba de la marca Pedrollo.

**Tabla 3.** Características electrobomba Pedrollo PQ3000.

Modelo	Potencia	Tensión	Consumo	Frecuencia	Altura manométrica máx.	Caudal altura máx.	Altura manométrica mín.	Caudal altura mín.	Temperatura	Vida útil
PQ3000	3 Hp	220 V	14.2 Amp	60 Hz	180 m	7 200 l/día	0-50 m	72 000 l/día	0-90°C	20 años

Fuente: Pedrollo (2023).

Se evaluaron los costos entre las dos posibles alternativas de bombeo a implementar: bomba ZM 95 Maxxi y electrobomba Pedrollo PQ3000; se tuvo en cuenta la instalación de la red hidráulica, construcción

de la cimentación y mano de obra; para la bomba Pedrollo se hizo necesario la suma del coste de llevar la energía hasta la represa, donde consideraron montaje de postes, trenzado (cableado), herraje y medidor (contador).

Además de los costos de toda la instalación de cada una de las bombas, se tuvo en cuenta la depreciación de cada una de ellas anualmente al momento de la selección. Para la depreciación anual, se utilizó la Ecuación (1) de depreciación lineal:

$$Da = Vi/Vu \quad (1)$$

$Da$  = depreciación anual

$Vi$  = valor inicial del equipo

$Vu$  = vida útil en años

Para los costos de mantenimiento de las bombas se consideraron tareas básicas de limpieza, lubricación, ajustes e inspección visual, a fin de evitar o mitigar las consecuencias de los fallos de los equipos, con lo cual se lograron prevenir las incidencias antes de que ocurrieran. En el caso de la bomba ZM, los costes de mantenimiento preventivo corresponden al cambio de aceite, sustitución de los empaques, lubricación de rodamientos y limpiezas de las válvulas. Para la bomba Pedrollo, el costo de mantenimiento hace referencia a la sustitución y lubricación de empaques o sello mecánico, lubricación de rodamientos y mano de obra. Según recomendaciones dadas por los distribuidores, es necesario realizar mantenimiento cada seis meses para cada una de las

bombas y así mantener la conservación de los equipos, para garantizar un buen funcionamiento y fiabilidad, además de evitar gastos de acciones correctivas.

## Resultados

### Cálculos para selección de la bomba

Definición de la necesidad. Según se describió en la sección anterior, se determinó que se requería un caudal de agua de 70 000 l/día desde la represa hasta el reservorio, con una diferencia de altura vertical de 22 m y una longitud del tubo de represión estimada en 688 m. Con base en los datos anteriores se dimensionan el diámetro de la tubería, pérdidas y altura máxima de descarga.

### Selección del diámetro de la tubería

Se consideró el caudal deseado, así:

$$70\,000 \text{ l/día} = 2916.6 \text{ l/hora} = 2.916 \text{ m}^3/\text{hora}$$

De la Tabla 4 de pérdidas de carga, se establece que, para un caudal mínimo de 2.916 m<sup>3</sup>/h, aproximado a 3 m<sup>3</sup>/h, resulta apropiado seleccionar un diámetro de tubería de 1 ½", dado que las pérdidas pueden equivaler al 1.5 % de la longitud de tubería de plástico a través de la cual se conduce el fluido, lo cual se consideró pertinente.

**Tabla 4.** Cuadro de pérdidas de carga en 100 m de tubería.

Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Diámetro (in)		
	1.1/4"	1.1/2"	2"
2.0	2.10	0.7	0.25
2.5	3.10	1.10	0.37
3.0	4.20	1.50	0.5
3.5	5.50	1.95	0.68
4.0	7.00	2.50	0.85

Fuente: ZM Bombas (2020).

### Cálculo de la altura de elevación

Se consideró la altura perdida, así:

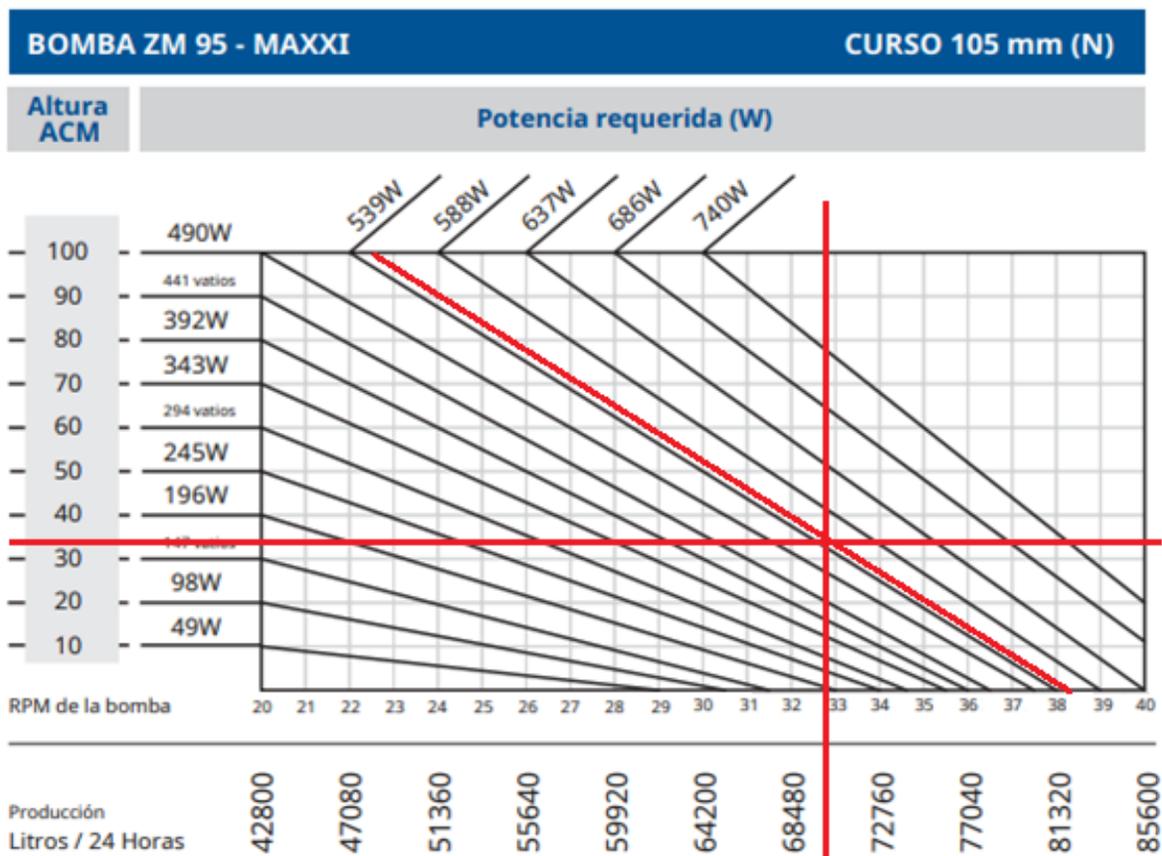
$$\frac{688 \text{ m}(1,5)}{100} = 10,32 \text{ m}$$

Entonces, la altura total en metros de columna de agua (MCA) se calcula como la suma de la altura de desnivel vertical más la altura perdida, así:

$$22 \text{ m} + 10.32 \text{ m} = 32.32 \text{ m}$$

## Selección del modelo de la bomba

Se verificaron los datos de las curvas características en el catálogo y, tal como se mencionó en la sección anterior (Figura 8), se consideró apropiada la bomba ZM95 (N), configurada con un curso de 105 mm para una altura MCA (metros columna de agua) de 32.32 m y una producción de 70 000 l/día, tal que, como puede apreciarse en la Figura 11, requerirá una potencia aproximada entre 539 y 588 W proveniente de su rueda motriz, girando a unos 33 rpm.



**Figura 11.** Curva característica de bomba ZM 95 MAXXI. Fuente: ZM Bombas (2020).

## Selección de la rueda motriz

El modelo de la rueda fue determinado por la potencia requerida máxima de 588 W. Lo que a su vez dependerá del caudal del agua disponible para la rueda que —como se describió en la sección anterior mediante medición por aforo volumétrico— es de 55 l/s. En este caso, con una rueda de 2 m de diámetro con 0.35 m de ancho se podría disponer de una potencia útil de 593 W con el caudal disponible en la salida de la represa (Tabla 5).

**Tabla 5.** Selección de diámetro de rueda.

Caudal (l/s)	Diámetro de rueda (m)			Ancho de la rueda (cm)
	2.00	1.80	1.50	
	Potencia útil (W)			
60.0	647	588	500	35
57.5	620	564	480	
55.0	593	539	458	
52.5	566	515	435	
50.0	539	490	415	



Fuente: ZM Bombas (2020).

## Comparación de alternativas para validación del diseño

Para la elección del mejor sistema de bombeo mediante la comparación entre la bomba hidráulica y una electrobomba como alternativa convencional económica en inversión inicial se realizó la evaluación de costes. En la Tabla 6 se muestran los costos de las dos posibles alternativas de bombeo a implementar: bomba ZM 95 Maxxi y electrobomba Pedrollo PQ3000. La inversión inicial se especifica en la siguiente sección del presente artículo; el coste de instalación de la alternativa ZM 95 Maxxi se corresponde con la Introducción, Materiales y métodos, Resultados y Discusión del presupuesto; mientras que el coste del equipo y los accesorios que es necesario comprar para su puesta en marcha se detallan en los Resultados. Es importante aclarar que estos valores consideran, además, los gastos indirectos, que alcanzan un 20 % de cada inversión; esto también se detalla en la siguiente sección.

**Tabla 6.** Comparación económica de los sistemas de bombeo.

Alternativa de bombeo	Inversión inicial		Coste de operación		
	Coste del equipo + accesorios (Resultados)	Coste de instalación (Introducción, Materiales y métodos, Resultados y Discusión)	Coste consumo eléctrico anual	Mantenimiento preventivo anual	Depreciación anual
Bomba ZM 95 Maxxi	COP 29.360.520	COP 8.637.378	COP 0	COP 430.000	COP 788.333,3
	USD 7.155	USD 2.105	USD 0	USD 105	USD 192
Electrobomba Pedrollo PQ3000	COP 2.900.000	COP 20.500.000	COP 12.146.112	COP 300.000	COP 145.000
	USD 706	USD 4.994	USD 2.959	USD 73	USD 35

Cabe destacar que aunque los costos de la bomba ZM 95 Maxxi son muy elevados a corto plazo en comparación con el otro método de bombeo, a largo plazo se compensaría con la poca mano de obra requerida para su operación, y con el no uso de algún tipo de energía o combustible para su funcionamiento debido a que aprovecha la energía renovable disponible en el lugar. Por su parte, el costo de inversión inicial de la bomba Pedrollo PQ3000 se incrementa notoriamente si se considera, dentro del gasto de instalación, la alimentación de energía eléctrica proveniente de la red local hasta el sitio de la represa, tal como se explicó en la sección de metodología de comparación de alternativas.

Ambas inversiones se recuperarían como resultado del incremento en la producción pecuaria de la zona alta de la finca, pero vale la pena resaltar, a partir de los datos reportados en la Tabla 6, que si se considerara solamente el ahorro en el costo de consumo de energía eléctrica como si fuera un ingreso, el tiempo de retorno de la inversión en la bomba ZM 95 Maxxi sería de tres años y tres meses, lo que se considera un tiempo de recuperación corto.

## Presupuesto para instalación de bomba hidráulica ZM

El presupuesto se secciona en cinco capítulos, que corresponden a cada una de las actividades que se debían realizar en su respectivo orden; para estimar el gasto de todo el montaje se tomaron en cuenta los costos de los equipos, materiales y de mano de obra que se requerirían para ejecutar cada una de ellas.

- **Capítulo 1. Introducción:** hace referencia al levantamiento aerofotogramétrico, estudio topográfico a realizarse por medio de dron, hecho para obtener toda la información del terreno en cuanto a su

caracterización: límites, cerramientos, distribución, vías de acceso, áreas, curvas de nivel, etcétera. Valor de 3 550 000 COP (865 USD).

- **Capítulo 2, Materiales y métodos:** adecuación del terreno; se realizaron dos actividades correspondientes a la limpieza y nivelación del terreno, donde se removió toda la vegetación y escombros alrededor de la zona de instalación de la bomba, y se niveló el suelo debido a las irregularidades que presentaba. Valor de 84 950 COP (21 USD).

- **Capítulo 3, Resultados:** placa de concreto. Se desglosa con el uso de arena, cemento y triturado, además de la mano de obra, calculados para la fundición de una placa con dimensiones de 3 x 3 m, con 10 cm de espesor. Valor de 612 865 COP (149 USD).

- **Capítulo 4, Discusión:** red hidráulica, se utilizaron rollos de manguera de polietileno de 1½", con una longitud de 90 metros. Para este capítulo se tuvo en cuenta un ítem de mano de obra que hace referencia a la excavación e instalación manual de la manguera sobre una hendidura de 20 cm de ancho por 50 cm de profundidad, con una longitud de 688 M. Valor de 2 950 000 COP (719 USD).

- **Capítulo 5, Conclusiones:** sistema de bombeo. En esta sección se tuvieron en cuenta todos los accesorios que derivan de la bomba hacia la tubería de succión y conducción (manómetro, llave de paso, válvula de pie, abrazaderas, acople rápido, macho PVC 1½", codo 1½", tubo de 1½", tee galvanizado de 1½", buje reductor galvanizado, llave de paso galvanizada, válvula check, tubería de aguas negras de 10"), teniendo en cuenta, además, los precios de la bomba, rueda y tambor plástico. Valor de 24 467 100 COP (5.960 USD) para un valor subtotal directo de 31 664 915 COP (7 714 USD).

A esto también se agregó un apartado dedicado a los costos indirectos, correspondientes a los gastos administrativos (5 %), imprevistos (5 %) y de utilidad (10 %), lo que da como resultado un costo total de 37 997 898 COP (9 257 USD) de la ejecución de todo el proyecto.

## **Instalación del sistema de bombeo hidráulico**

### **Montaje del conjunto**

Para el montaje de la bomba se tuvieron en cuenta varios aspectos para un funcionamiento sin interrupciones. Se eligió un lugar cercano a la represa de fácil acceso, donde la vegetación permitiera la operación del equipo y en donde se facilitara la captación del agua que acciona el sistema; dicho montaje puede apreciarse en la Figura 12. Una vez hecho el montaje de la bomba, rueda y caballete sobre la base de albañilería que se aprecia, fue necesaria la instalación de barras de acero angulares soldadas sobre el caballete para soportar la tubería de 10" encargada del accionamiento del sistema (Figura 12) debido a que la tubería no se podía mantener suspendida en equilibrio por su propio peso y el agua que necesita transportar. Esta tubería se ubicó a 10 cm aproximadamente de la rueda y sobre el eje de ésta, con una ligera pendiente, atendiendo las recomendaciones presentadas en la Figura 9, lo que permitió la caída de agua por gravedad y garantizar el mayor potencial hidráulico.

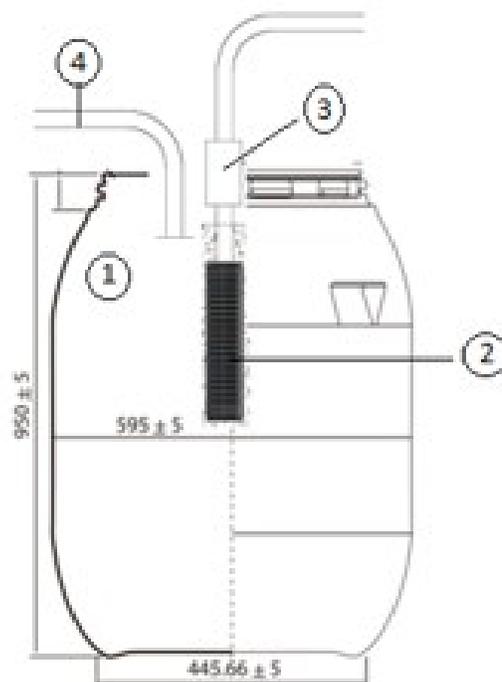


**Figura 12.** Montaje del conjunto de la Bomba ZM 95 MAXXI (izquierda); tubería de accionamiento del sistema (derecha).

### Sistema de captación y succión de agua

La captación del sistema está compuesta por: (1) tambor plástico de 200 litros; (2 y 3) válvula de pie roscada con filtro, que permite el paso del agua en una dirección, evitando el descebado de la bomba; esta válvula es de bronce, lo que garantiza una mayor resistencia a la corrosión y una mayor vida útil, y (4) tubería de alimentación de agua. En la Figura 13 se puede observar el montaje de la succión de agua del sistema de bombeo. En este punto fue necesario hacer uso de una malla que va por encima del tambor plástico, para evitar que los desprendimientos de hojas y ramas cayeran directamente al agua captada y perjudicaran la calidad del caudal a ser succionado. Gracias al nivel de la represa que se encuentra a unos 2 m por encima del cuerpo de bomba se garantiza el llenado del tambor plástico alimentado por una tubería por medio de la gravedad;

una vez lleno el tambor, el agua se desborda retomando de nuevo su cauce, y se garantiza su nivel.



**Figura 13.** Composición del sistema de captación y succión.

### Sistema de descarga

Para empezar con la instalación de la tubería o línea de descarga, se tomaron los siguientes accesorios: válvula de bola en latón de 1½", válvula check de cortina en bronce de 1½" y un manómetro de 240 psi horizontal de 1½"; se les agregó cinta teflón alrededor del niple de cada uno, para lograr un mejor empalme y evitar fugas de agua; este ensamble se evidencia en la Figura 14. Posteriormente, una vez puestos los accesorios que salen del ariete, se utilizó una manguera de polietileno con un diámetro mayor al obtenido en los cálculos de diseño, siendo éste de

un diámetro de 2", con base en las enmiendas internas de la manguera, que es de menor diámetro y no permitía el empalme con los accesorios; esta manguera solo se instaló al inicio en un tramo de 10 m, donde luego, por medio de una unión de tubería, se redujo el diámetro de la manguera al seleccionado anteriormente en el diseño de 1½".



**Figura 14.** Puesta de accesorios de la tubería de descarga.

## Puesta en marcha

Terminado todo el proceso de instalación, se comprobó que los datos teóricos que se obtuvieron mediante los cálculos realizados guardarán una relación con los datos obtenidos con la puesta en marcha de la bomba. Para lo anterior se usó el método de aforo volumétrico, procedimiento que se efectuó a la salida de la tubería de descarga (línea de conducción), y

en el que se emplearon herramientas de medición convencionales, como balde de volumen conocido (10 litros) y un cronómetro. En la Tabla 7 se presentan los resultados de los aforos realizados.

**Tabla 7.** Tiempo promedio de aforo volumétrico.

Volumen (l)	Tiempo (s)
10	12
10	13
10	13
10	12
10	14
10	12
10	12
10	13
10	12
10	13
<b>Promedio:</b> 12.6	

Conocido el volumen y tiempo de llenado del balde, se calculó el caudal mediante la Ecuación (2):

$$Q = V/t \quad (2)$$

Donde:

$Q$  = caudal (l/s; m<sup>3</sup>/h; m<sup>3</sup>/día)

$V$  = volumen (l;  $m^3$ )

$t$  = tiempo (s; h; día)

$$Q = \frac{10 \text{ l}}{12.6 \text{ s}} = 0.7936 \text{ l/s}$$

$$0.7936 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 2\,857.14 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 2.857 \frac{m^3}{h} = 68.57 \frac{m^3}{\text{día}}$$

Dando como resultado un caudal promedio de 0.7936 l/s, el equivalente a 68.57  $m^3$ /día; este resultado es ligeramente menor al exigido por el propietario de 70  $m^3$ /día, pero está dentro de un margen de lo aceptable para poder satisfacer las necesidades de llenado del reservorio para su posterior uso en el riego para la producción de forraje para ganado.

## Discusión

El sistema de bombeo implementado con la bomba ZM Maxxi demostró ser una solución eficiente y sostenible para satisfacer las necesidades hídricas de la finca La Esperanza durante épocas de sequía. Este sistema, basado en el aprovechamiento de energía hidráulica, cumplió con el objetivo de bombear un caudal promedio de 68.57  $m^3$ /día a un reservorio ubicado a 22 metros de altura y a 688 metros de distancia, sin incurrir en costos de consumo eléctrico. Aunque la inversión inicial del sistema ZM Maxxi es mayor, si se compara con la electrobomba Pedrollo PQ3000, su costo operativo es prácticamente nulo debido a la eliminación del

consumo eléctrico. Esto resulta en un tiempo de recuperación de la inversión de solo tres años y tres meses, lo que valida su viabilidad económica en escenarios agrícolas con acceso limitado a la red eléctrica.

Los resultados obtenidos se alinean con estudios previos sobre sistemas de bombeo que emplean energías renovables. Por ejemplo, Guaña-Quilumba y Quishpe-Sacancela (2018) reportaron la implementación de un sistema similar que impulsaba agua a 700 metros de distancia utilizando una bomba hidráulica; destaca también una significativa reducción de gastos operativos y una vida útil prolongada. Sin embargo, el presente estudio introduce una optimización adicional, al reducir pérdidas de carga mediante una adecuada selección del diámetro de tubería y un diseño específico del sistema de captación, lo cual garantiza un caudal estable incluso en condiciones de máxima exigencia.

En contraste, la electrobomba convencional analizada en este estudio presenta ventajas en costos iniciales (Pedrollo, 2023). Sin embargo, su dependencia de la energía eléctrica y los gastos asociados con su operación anuales —que ascienden a 12 146 112 COP (2 958 USD)— limitan su competitividad en el largo plazo. Además, la vida útil de esta alternativa, estimada en 20 años, es significativamente inferior a la de la bomba ZM Maxxi, que alcanza los 30 años, según datos del fabricante y experiencias previas (ZM Bombas, 2020).

El sistema ZM Maxxi no solo representa una solución económica, sino también ambientalmente sostenible, al emplear una fuente de energía renovable. Estudios como los de Arias *et al.* (2021) subrayan la importancia de implementar tecnologías hidráulicas en áreas rurales para reducir emisiones de carbono asociadas con el uso de combustibles fósiles y mejorar la autonomía energética de las comunidades. En este contexto, el presente proyecto contribuye de forma significativa con el desarrollo

sostenible del sector agrícola y muestra que la inversión en tecnología hidráulica puede ser un catalizador para la productividad rural y la resiliencia frente al cambio climático.

## Conclusiones

La implementación del sistema de bombeo ZM Maxxi cumplió con los objetivos de disponer de agua en un reservorio en la parte alta de la finca para la producción de forraje mediante un sistema de bombeo sin consumo de energía eléctrica; fue el más económico y sostenible en el tiempo.

La bomba hidráulica ZM Maxxi demostró ser una solución efectiva para transportar casi 70 m<sup>3</sup> de agua por día a un reservorio situado a 22 metros de altura y 688 metros de distancia, sin incurrir en costos de energía eléctrica. Este sistema contribuyó de manera significativa a mejorar el abastecimiento hídrico de la parte alta de la finca La Esperanza durante las épocas de sequía.

Comparado con una electrobomba convencional, el sistema de bombeo ZM Maxxi ofrece un ahorro anual de COP 12 146 112 (2 958 USD) al no requerir electricidad para su operación, lo que resulta en una recuperación de la inversión a mediano plazo.

Aunque el gasto inicial de instalación del sistema con la bomba ZM Maxxi fue mayor que el de una electrobomba COP 37 997 898 (9 255 USD) frente a COP 23 400 000 (5 699 USD), los costos operativos del sistema ZM Maxxi son significativamente menores, al eliminar el consumo energético y reducir los gastos de mantenimiento, lo que lo convierte en la opción más viable a largo plazo.

El sistema implementado tiene un caudal de entrega de 68 570 litros de agua por día, lo que cumple con las necesidades de riego para la producción de forraje para el ganado en la finca; ello mejora la sostenibilidad de las actividades ganaderas en la zona.

La bomba ZM Maxxi tiene una vida útil estimada de 30 años y supera a la electrobomba, que tiene una vida útil de 20 años, lo que resalta aún más la rentabilidad a largo plazo del sistema de bombeo seleccionado.

### Agradecimientos

Agradecimientos al Centro Tecnológico de Ingeniería GEOMAAC y a la Universidad Surcolombiana por su invaluable colaboración en este proyecto. Su apoyo y recursos han sido fundamentales para la realización de la presente investigación.

### Referencias

- Arias, L., Olaya, F., & Ardila, J. G. (2021). Caracterización y redimensionamiento de sistema de bombeo de agua para cultivos acuícolas en finca el Rubí en Aipe-Huila. *Revista Ingeniería y Región*, 25, 72. DOI: 10.25054/22161325.2780
- Bermeo-Mayancela, E. E. (2022). *Estrategias de mercado para pequeños productores agrícolas de las comunidades indígenas de la organización Tukayta del cantón Cañar* (Bachelor's thesis). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

- Chávez-Schaw, J. M. (2014). *Análisis y diseño de cimentaciones para turbinas hidráulicas en hidroeléctricas medianas* (Doctoral dissertation). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Díaz-Rodríguez, N., & Pérez-Guerrero, J. N. (2007). Metodología para evaluar el impacto de la maquinaria agrícola sobre los recursos naturales del medio ambiente. *Ciencias Holguín*, 13(2), 1-12.
- Gras, C., & Hernández, V. (2016). Modelos de desarrollo e innovación tecnológica: una revolución conservadora. *Mundo Agrario*, 17(36), 1-37.
- Guaña-Quilumba, F. R., & Quishpe-Sacancela, E. V. (2018). *Diseño e implementación de un sistema para impulsar agua desde una vertiente hasta un tanque de distribución a 700 m de distancia mediante un sistema de bombeo* (Master's thesis). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- Leibovich, J., & Estrada, L. (2008). *Competitividad del sector agropecuario colombiano basado en el estudio: diagnóstico y recomendaciones de política para mejorar la competitividad del sector agropecuario colombiano*. Bogotá, Colombia: Consejo Privado de Competitividad.
- Palacio-Castañeda, N. (2010). *Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia* (Bachelor's thesis). Universidad de Antioquia, Colombia.
- Pedrollo. (2023). *Pedrollo, Catálogo general*. Recuperado de [https://www.pedrollo.com.co/public/allegati/PK\\_ES\\_60Hz.pdf](https://www.pedrollo.com.co/public/allegati/PK_ES_60Hz.pdf)

- Polanco-Puerta, M. F. (2007). *Maquinaria y mecanización agrícola*. Bogotá, Colombia: Universidad Abierta y a Distancia.
- Santos, L. K. C. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(14), 25-32. DOI: 10.29018/issn.2588-1000vol2iss14.2018pp25-32
- UPRA, Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2024). *Población ocupada del sector agropecuario aumentó 147.685 personas durante diciembre de 2024*. Recuperado de <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/>
- ZM Bombas. (2020). *Hidrometalurgia ZM limitado*. Recuperado de [www.zmombas.com.br](http://www.zmombas.com.br)