

**CN** *Ciencia  
Nicolaita* 91



**Agosto de 2024**

Revista Científica

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

# *Ciencia Nicolaita*

ISSN: 2007-7068

**Jesús Campos García**

*Coordinador de la Investigación Científica*

**José López Bucio**

*Editor*

## *Comité Editorial*

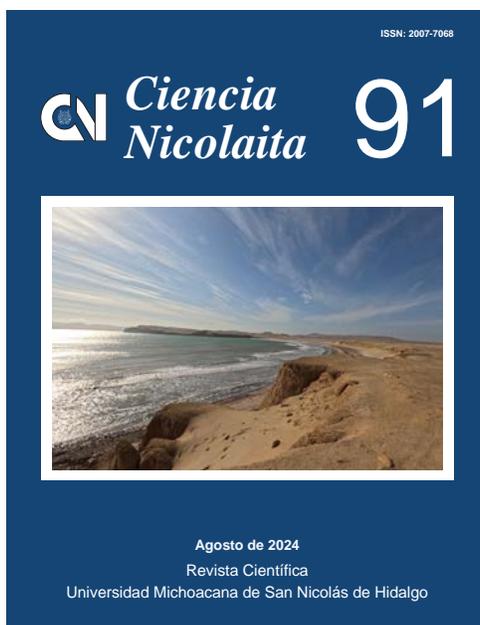
**Luca Tessieri**, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, CONAHCyT – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil; **Rosa Elva Norma del Rio Torres**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas; **Joel Edmundo López Meza**, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; **Héctor Eduardo Martínez Flores**, Facultad de Químico Farmacobiología; **Francisco Shidhartha Guzmán Murillo**, Instituto de Física y Matemáticas; **José Antonio González Cervera**, Instituto de Física y Matemáticas; **José María Ponce Ortega**, Facultad de Ingeniería Química; **Ernesto García Pineda**, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas.

## *Comité Editorial Externo*

**Daniele Colosi**, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Universidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

**Apoyo editorial y maquetación:** Fidel Anguiano Rodríguez.

**Administrador página web:** Hugo César Guzmán Rivera.



# *Ciencia Nicolaita*

ISSN: 2007-7068

Revista Ciencia Nicolaita número 91, Agosto de 2024  
<https://www.cic.cn.umich.mx/cn>

Portada: Línea de costa, reserva natural de Paracas

<b>Directorio</b>	i
<b>Contenido</b>	ii
<b>Presentación</b>	v

## **FÍSICO-MATEMÁTICAS Y CIENCIAS DE LA TIERRA**

### **Valoración de acolchados ecoplásticos utilizados para reducir la evaporación en suelos agrícolas**

Luz Adriana Arias Hernández, Emilio Juaristi Videgaray, Héctor Eduardo Mares Martínez, Rudy Solís Silván, María Maldonado Santoyo, Felicitas Calderón Vega,

Jesús Fernando Valdés Vázquez, Eladio Delgadillo Ruiz

doi:10.35830/cn.vi91.757

1

### **Confiabilidad en las técnicas colorimétricas para la determinación de sólidos suspendidos como parámetros de calidad del agua**

Itzel Luviano Soto, Yajaira Concha Sánchez, Bertha Alejandra Olmos Navarrete,

Gabriel Arroyo Correa, José Vega Cabrera

doi:10.35830/cn.vi91.759

10

- Determinación de sólidos suspendidos como parámetros de calidad del agua a partir de técnicas de impacto acústico y su efectividad**  
Itzel Luviano Soto, Yajaira Concha Sánchez, Bertha Alejandra Olmos Navarrete,  
Gabriel Arroyo Correa, José Vega Cabrera 22  
doi:10.35830/cn.vi91.761
- Evolución histórica del análisis de peligro por inundaciones en el municipio de León, Guanajuato (2006 - 2018)**  
Norma Claudia Calderón Rosas, José de Jesús Esparza Claudio 33  
doi:10.35830/cn.vi91.762
- Evaluación de la problemática de abastecimiento y saneamiento de agua en el área periurbana del poniente de la ciudad de San Luis Potosí**  
Juan José Félix Carrillo, Cristóbal Aldama Aguilera, Rodolfo Cisneros Almazán,  
Hermann Rocha Escalante, Luis Armando Bernal Jácome 44  
doi:10.35830/cn.vi91.765
- Estudio hipotético de la rotura de la cortina de la presa Yosocuta, Oaxaca**  
Oscar Jesús Llaguno Guilberto, Jairo Valente Gutiérrez Sosa,  
Juan Manuel Figueroa Mendiola, Jomaelah Morales Rayo, Juan Maldonado Silvestre,  
José Manuel Rodríguez Varela, Eduardo López López 59  
doi:10.35830/cn.vi91.773
- Evaluación de los recursos hídricos en el acuífero “Área Metropolitana de Monterrey” en la última década y sus implicaciones en la crisis hídrica de la zona**  
Ulises Absalom Barajas Madrigal, José Jaime Madrigal Barrera, Liliana García Romero, Sonia  
Tatiana Sánchez Quispe 69  
doi:10.35830/cn.vi91.791
- Identificación de zonas de riesgo por inundación en la Ciudad de Morelia, Michoacán, y propuesta de un sistema de monitoreo a través de estaciones meteorológicas**  
Israel García Ledesma, Sonia Tatiana Sánchez Quispe, Jesús Pardo Loaiza,  
Constantino Domínguez Sánchez 83  
doi:10.35830/cn.vi91.793
- Distribución y características de tierras campesinas en la microcuenca Atécuaro**  
María Alcalá De Jesús, Rogelio García Rangel, Juan Carlos González Cortés,  
Juan Carlos Montero Castro, María Elena Granados García 91  
doi:10.35830/cn.vi91.794
- Comparación sedimentológica de tres sitios en la llanura costera chiapaneca: posibles evidencias de eventos catastróficos**  
Diana Cinthia Soria Caballero, Gabriela Domínguez Vázquez, Dulce M. Bocanegra Ramírez 98  
doi:10.35830/cn.vi91.797

## BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

### **Nuevos horizontes: revelando el potencial transformador de la biología sintética**

Haidi Medina Martínez, Berenice Yahuaca Juárez, Marina Velarde Sánchez,  
Liliana Márquez Benavides 113  
doi:10.35830/cn.vi91.799

### **Levaduras del género *Pichia* y su uso potencial en el desarrollo biotecnológico**

Ana Karen Calderón Ordaz, Juan Carlos González Hernández,  
María del Carmen Chávez Parga 125  
doi:10.35830/cn.vi91.802

### **La inoculación con *Azospirillum baldaniorum* Sp245 promueve la acumulación de ácido ascórbico, y disminuye la expresión de la cinasa TOR y la división celular en la raíz de *Arabidopsis***

Alma Alejandra Hernández Esquivel, Jorge Alejandro Torres Olmos, Marisol Bernal Avilés,  
Manuel Méndez Gómez, Elda Castro Mercado, Cesar Arturo Peña Uribe,  
Homero Reyes de la Cruz, Ernesto García Pineda 136  
doi:10.35830/cn.vi91.805

## INGENIERÍAS

### **Elaboración de un material compuesto para la fabricación de sensores mecánicos**

José Ignacio Ramírez, Juan Felipe Soriano Peña, Carlos Manuel Sánchez González,  
Miguel Villagómez Galindo 148  
doi:10.35830/cn.vi91.736

### **Evaluación energética y factibilidad económica de la integración de un ciclo de refrigeración por absorción y turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico de baja temperatura geotérmica**

Héctor Isaac Cardoza Villegas, Aneth Lizbeth Trejo Marmolejo,  
Carlos David González Gachupin, Oscar Chavez, Israel Y. Rosas, Víctor M. Ambriz Diaz 154  
doi:10.35830/cn.vi91.808

## MISCELÁNEA

### **Una revisión sobre las posibilidades de autosuficiencia energética y reutilización de agua en las plantas de tratamiento de agua residual en México**

Carmen Cecilia García Castillo, Hilda R. Guerrero García Rojas,  
Erandi Maldonado Villalpando 171  
doi:10.35830/cn.vi91.760

**Normas editoriales** 181

**Página legal y créditos** 186

# Presentación

La publicación de textos científicos es de gran relevancia social, ya que permite difundir los avances y descubrimientos de una manera clara y precisa en las diferentes áreas del saber, adquiridos a través del trabajo de campo, así como del que se realiza en las aulas y laboratorios. La labor editorial es esencial para mantener un proceso riguroso, pero a la vez empático y atractivo tanto para los autores como para los lectores, por lo que representa un reto continuo. **Ciencia Nicolaita** se renueva, presentando un formato de actualidad, sin descuidar el proceso estricto de revisión por pares, maquetado y corrección de estilo que caracteriza a nuestra revista. Se han hecho ajustes a la información para los autores y se informa que todos los manuscritos que se publican pasan por un proceso de revisión de similitud de contenido mediante el programa *iThenticate*, lo que garantiza por una parte la originalidad y a la vez el respeto intelectual de nuestros contenidos. Otra característica, no menos importante, es la asignación del identificador digital (DOI) para cada uno de los artículos publicados.

En referencia al contenido de este número, de especial relevancia es mencionar el papel determinante de **María Lourdes González Arqueros**, editora de la sección de **Ciencias de la Tierra**, en la construcción del actual contenido, en el que se incluyen artículos que abordan temas como el desarrollo de nuevos materiales, sustentabilidad energética y ambiental, calidad del agua, predicción del impacto de desastres naturales, distribución de suelos y biotecnología vegetal y microbiana, que reflejan claramente las tendencias en investigación en estas diferentes áreas. Al final de este número se incluyen los lineamientos editoriales actualizados y la información para los autores.

En el área de nuevos materiales, el artículo “Elaboración de un material compuesto para la fabricación de sensores mecánicos”, se propone un material compuesto de silicona y fibra de carbono para su aplicación en sensores de vibraciones, empleados en rotores y apoyos de maquinarias y mecanismos, con la finalidad de detectar y prevenir fallas de funcionamiento. Los materiales con características novedosas también tienen gran impacto en la agricultura, aquí se propone el uso de ecoplásticos para la implementación de acolchados que contribuyen a conservar la humedad del suelo y reducir la evaporación, utilizando mezclas de compuestos orgánicos en diferentes proporciones.

En el artículo, “Evaluación energética y factibilidad económica de la integración de un ciclo de refrigeración por absorción y turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico de baja temperatura geotérmica”, se presenta la integración de un ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto y una turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico activado con energía geotérmica de baja temperatura. La implementación práctica de este proyecto tiene implicaciones para la utilización de energía limpia de una manera eficiente.

Las plantas de tratamiento de agua residual representan una forma de manejo de los desechos urbanos, efectiva ante la alternativa del vertido ambiental de los mismos. No obstante, en México, dichas instalaciones llegan a constituir una carga insostenible para los municipios por los costos de operación y mantenimiento, así como por el impacto negativo ambiental de los subproductos que generan, como los residuos sólidos urbanos y los lodos

residuales contaminados. En este número se presenta una revisión sobre las posibilidades de autosuficiencia energética y el establecimiento de políticas públicas para la reutilización del agua residual. En el tema del manejo del agua, especial relevancia ocupan las inundaciones, particularmente durante la temporada de lluvias, ya que afectan el entorno social, de servicios, económico y financiero, dejando vulnerable, principalmente a la población de escasos recursos, como se ha evidenciado recientemente en la zona de Chalco, en el estado de México. En el trabajo “Evolución histórica del análisis de peligro por inundaciones en el municipio de León, Guanajuato (2006 - 2018)”, se describe la evolución histórica del peligro por inundaciones con información climatológica, hidrológica y topográfica, dejando implícita la importancia de determinar llanuras de inundación, y con ello, estimar la vulnerabilidad y riesgo potencial de zonas de interés. En este mismo sentido, García Ledesma y colaboradores recopilan información histórica sobre inundaciones previas que han impactado la Ciudad de Morelia, para identificar las áreas más afectadas y, en consecuencia, delimitar su área de influencia. Esto condujo a la identificación de ubicaciones estratégicas para la instalación de estaciones de monitoreo y sistemas de alerta temprana, que permitan a la población protegerse ante tales eventos.

En el estudio hipotético de la rotura de la cortina de la presa Yosocuta, Oaxaca, se realiza una simulación sobre dicho daño, para conocer la magnitud de su impacto en las tierras y municipios aledaños. Un evento de este tipo podría ocasionar la pérdida de los bienes materiales de los pobladores, una interrupción de los servicios y daños a los cultivos, imposibilitando la recolección de las cosechas, afectando el autoconsumo y la venta de los productos con las consecuentes pérdidas económicas.

Mientras ciertas regiones son cada vez más propensas al riesgo de inundaciones, la presión sobre los acuíferos que suministran el vital líquido a los núcleos urbanos va en aumento, por ejemplo, la crisis hídrica vivida en el área Metropolitana de Monterrey durante el año 2022, o la suscitada en el sistema Cutzamala que alcanzó uno de sus máximos históricos en este año. Barajas Madrigal y colaboradores, estudiaron las implicaciones en la crisis hídrica de la zona urbana de Monterrey, Nuevo León, mediante una modelación hidrológica superficial y subterránea, recopilando información climática, hidrométrica, fisiográfica, hidrogeológica y de extracciones. Así, se sugiere que la problemática probablemente sea la creciente demanda originada por el aumento poblacional y que no se debe únicamente a factores climáticos. En el trabajo de Félix Carrillo y colaboradores, se realiza un análisis que conlleve a mejores escenarios de demanda, disponibilidad y calidad del agua, con base en la evaluación de infraestructura, planes de manejo y la contaminación de caudales naturales. Ambos estudios nos ofrecen herramientas valiosas para la sustentabilidad del recurso hídrico.

Los sólidos suspendidos son un parámetro de calidad del agua que se obtiene por pruebas de laboratorio, las cuales suelen ser costosas, sin embargo, existen métodos alternativos como las pruebas colorimétricas y de impacto acústico. Luviano Soto y colaboradores reportan el análisis colorimétrico y de impacto acústico de muestras de agua, permitiendo una adecuada predicción de la concentración de sólidos suspendidos, pudiendo instrumentarse como técnicas alternativas sin la necesidad de equipo e instalaciones costosas, así como personal especializado.

El monitoreo de los recursos naturales y el estudio de sus características es fundamental para

toda sociedad. Es consabida la percepción que tienen los campesinos sobre las propiedades y diversidad de los suelos o tierras en que desempeñan sus actividades y les han otorgado una nomenclatura empírica que está vinculada con su manejo. Sin embargo, el mapeo preciso y la distribución regional de los suelos demanda estudios científicos detallados. Alcalá y colaboradores, presentan un mapa con seis tierras campesinas en la microcuenca Atécuaro, en el estado de Michoacán, y se registra el saber tradicional sobre sus características y su distribución, que son únicas para cada clase de tierra. Trabajos como este contribuyen a definir estrategias de manejo eficiente del recurso, y su vocación productiva.

Las regiones costeras son áreas de suma importancia a nivel mundial, por su enorme productividad biológica y las diversas actividades humanas que allí se concentran. No obstante, estas zonas son extremadamente frágiles, no solo por los cambios de uso de suelo, la extracción de sus recursos y la contaminación, sino también por los efectos del calentamiento global. Soria Caballero y colaboradores, realizan la comparación sedimentológica de tres sitios en la llanura costera chiapaneca, mostrando posibles evidencias de eventos catastróficos, como el desbordamiento de ríos e inundaciones que ocurrieron en el pasado. Tales eventos han sido determinantes en la composición de sedimentos y la estratigrafía de dicha región, y su entendimiento nos informa de la fragilidad y resiliencia de los ecosistemas.

Finalmente, este número acerca a los lectores al conocimiento sobre la biología sintética, así como la biotecnología de plantas y microbiana. La biología sintética es una disciplina emergente que se emplea para diseñar y construir nuevos componentes, mecanismos y sistemas biológicos, con el fin de dotarlos de cualidades nuevas y mejoradas con un propósito definido, con aplicaciones en la medicina, la agricultura y el medio ambiente. En el ámbito de la agricultura, el género *Azospirillum* proporciona grandes ventajas a los cultivos por la capacidad que tienen estas bacterias de proveer nutrientes y hormonas. Hernández Esquivel y colaboradores demuestran que la inoculación con *Azospirillum baldaniorum* Sp245 promueve la acumulación de ácido ascórbico, y disminuye la expresión de la cinasa TOR y la división celular en la raíz de *Arabidopsis*, aspecto con repercusiones en el desciframiento del lenguaje que utilizan las bacterias para comunicarse con las plantas. Las levaduras son hongos que utiliza el hombre desde la antigüedad, entre las que destaca el género *Pichia* para la biosíntesis de productos valiosos. En el trabajo de revisión por Calderón Ordaz y colaboradores, se discuten soluciones innovadoras para la obtención de productos metabólicos con aplicaciones industriales mediante la ingeniería de procesos.

Para el comité editorial de la revista ***Ciencia Nicolaita*** es ampliamente satisfactorio presentar este número a nuestros lectores, esperando sea de su agrado, con la expectativa de recibir cada vez más contribuciones de todos los actores y participantes en la generación de conocimiento de frontera, y que nuestra revista pueda ser el vehículo que transmita dichos avances a la sociedad en su conjunto, a quienes nos debemos.

**José López Bucio**  
Editor



# Valoración de acolchados ecoplásticos utilizados para reducir la evaporación en suelos agrícolas

## Assessment of ecoplastic mulches used to reduce evaporation in agricultural soils

Luz Adriana Arias Hernández<sup>1</sup>, Emilio Juaristi Videgaray<sup>2</sup>, Héctor Eduardo Mares Martínez<sup>2</sup>, Rudy Solís Silván<sup>3</sup>, María Maldonado Santoyo<sup>4</sup>, Felicitas Calderón Vega<sup>2</sup>, Jesús Fernando Valdés Vázquez<sup>2</sup>, Eladio Delgadillo Ruiz<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, Av. Juárez No. 77, Col. Centro, C.P. 36000. Guanajuato, Gto., México.

<sup>2</sup> Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Av. Juárez No. 77, Col. Centro, C.P. 36000. Guanajuato, Gto., México.

<sup>3</sup> Tecnológico Nacional de México, Campus Comalcalco, Carretera. Vecinal Comalcalco-Paraíso Km. 2 Rancho Occidente. 3ra. Sección, Comalcalco, Tabasco.

<sup>4</sup> Centro de Innovación Aplicada a Tecnologías Competitivas, Omega # 201, Col. Industrial Delta, C.P. 37545. León, Gto.

### Historial

Manuscrito recibido: 28 de noviembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Eladio Delgadillo Ruiz

e-mail: e.delgadillo@ugto.mx

ORCID: 0000-0002-2004-5340

### Resumen

El uso de ecoplásticos para la implementación de acolchados contribuye a conservar la humedad del suelo y reducir la evaporación. El objetivo de este trabajo, por una parte, fue presentar una revisión de sobre la implementación de acolchados para proteger a los cultivos en la evapotranspiración, por otro lado, se realizaron pruebas a nivel experimental para la aplicación de ecoplásticos como acolchados, los cuáles se fabricaron a partir de 5 mezclas de compuestos orgánicos en diferentes proporciones y se evaluó el porcentaje de absorción de agua y humedad de los mismos mediante el método gravimétrico y el porcentaje de absorción de agua por método gravimétrico después de la inmersión, respectivamente. El análisis de Kruskal Wallis indicó diferencias significativas en las medianas del porcentaje de absorción de agua y humedad de las diferentes mezclas de bioplásticos probadas. Estos hallazgos respaldan la relevancia de los ecoplásticos como una alternativa en prácticas agrícolas.

**Palabras clave:** acolchado, evaporación, ecoplásticos, bagazo.

### Introducción

El uso eficiente del agua es fundamental para que se puedan llevar a cabo diversas actividades de los seres vivos, así como diversos procesos en el medio ambiente, por lo tanto, una gestión eficiente de su

### Abstract

The use of ecoplastic helps to conserve soil moisture and reduces evaporation. The objective of this work on the one hand, was to present a review on the implementation of mulches on evapotranspiration of crops and, on the other hand, experimental tests were carried out on the development of ecoplastics for their subsequent application as mulches, which were manufactured from 5 mixtures of organic compounds in different proportions and the percentages of water absorption and humidity were measured by the gravimetric method and the gravimetric method after immersion, respectively. The Kruskal Wallis analysis indicated significant differences in the median percentage for water and moisture absorption of the different blends of bioplastics tested. These findings support the relevance of ecoplastics as an alternative in agricultural practices.

**Keywords:** mulch, evaporation, ecoplastic, bagasse.

distribución ya sea superficial o subterránea ayuda a su disponibilidad. Sin embargo, existen factores que causan un desequilibrio entre los componentes del balance hídrico, como la disminución de zonas de infiltración en las que se presenta aumento de

escorrentía provocando mayor erosión de suelos.

Una de las actividades mayormente afectadas por la disponibilidad de agua es la agricultura y el rendimiento de los cultivos. En este escenario, el uso de acolchados permite además de reducir los riesgos de erosión del suelo, la protección del cultivo, la reducción de la pérdida de humedad del suelo, la preservación de las plantas y productos comestibles, la estabilidad del ecosistema, entre otros beneficios. Las técnicas agrícolas enfocadas en el uso de los acolchados mediante materiales plásticos o vegetales se han centrado en los efectos que provocan en las temperaturas de los perfiles superiores del suelo, así como también en la relación del desarrollo y rendimiento de los cultivos, en los que se ha tenido resultados positivos con las diversos tipos de acolchados en comparación con suelos sin acolchar (Chopra y Koul, 2020).

El objetivo de esta investigación fue, por una parte, presentar una revisión de diversas publicaciones a través de las cuales se recopiló información para analizar el efecto de la implementación de acolchados en la evapotranspiración, y por otro lado, se realizaron pruebas a nivel experimental del desarrollo de ecoplásticos para su posterior aplicación como acolchados.

### Primera parte: revisión sobre el tipo y usos de los acolchados

Los acolchados se clasifican de acuerdo a su composición como acolchados orgánicos (**Tabla 1**), acolchados inorgánicos (**Tabla 2**) y acolchados biodegradables (**Tabla 3**).

Además de los acolchados mencionados anteriormente se puede presentar otros componentes tales como sarmientos de poda triturados (Intrigliolo *et al.*, 2019), cultivos intercalados de mantillo (Canali *et al.*, 2017), mantillos vivos (Bhaskar *et al.*, 2021), compostas (Ghouse, 2020a), estiércol (Ghouse, 2020a), turba (Ghouse, 2020a), residuos de cultivo (Ghouse, 2020a), cáscara de café (Acheampong *et al.*, 2019), poda de viña (Zribi, 2011), paja de baira (Sanbagavalli *et al.*, 2017), hojas secas (Obalum *et al.*, 2011), hoja seca de plátano (Das *et al.*, 2022), trigo sarraceno (Pfeiffer *et al.*, 2016), guisante (Pfeiffer *et al.*, 2016), trébol carmesí y trébol rojo

**Tabla 1.** Tipos de acolchados de origen orgánico

Acolchado orgánico	Autores
Paja de coco	Jun <i>et al.</i> , 2014a; Lin <i>et al.</i> , 2016; Ren <i>et al.</i> , 2018; Yan <i>et al.</i> , 2018a; Yin <i>et al.</i> , 2015
Paja de sorgo	González, 2015
Paja de astillas de pino carrasco	Hueso-González <i>et al.</i> , 2017
Aserrín de madera	Ghouse, 2020a; Heid <i>et al.</i> , 2019; Zribi <i>et al.</i> , 2015
Paja de arroz	Brar <i>et al.</i> , 2019; Das <i>et al.</i> , 2022; Pérez, 2020; Rao <i>et al.</i> , 2016
Paja de trigo	Gómez, 2018; Kahlon <i>et al.</i> , 2013; Stigter <i>et al.</i> , 2018; Wang y Shangguan, 2015; Zribi, 2011; Yin <i>et al.</i> , 2015b; Zhang <i>et al.</i> , 2016a; Zheng <i>et al.</i> , 2018

**Tabla 2.** Tipos de acolchados de origen inorgánico

Acolchado inorgánico	Autores
Plástico negro	Amador-Ramírez <i>et al.</i> , 2013; Barajas-Guzmán y Barradas, 2011; Delgado Ramírez <i>et al.</i> , 2018a; Inzunza-Ibarra <i>et al.</i> , 2010, 2017; Lahoz <i>et al.</i> , 2014; Lara-Capistrán <i>et al.</i> , 2021; Li <i>et al.</i> , 2018a, 2018b; Mayolo, 2015; Montemayor <i>et al.</i> , 2018a; Munguía-López <i>et al.</i> , 2011; Patil y Tiwari, 2018a; Robledo-Torres <i>et al.</i> , 2010; Steinmetz <i>et al.</i> , 2016.
Plástico rojo	Inzunza-Ibarra <i>et al.</i> , 2010; Lara-Capistrán <i>et al.</i> , 2021; Robledo-Torres <i>et al.</i> , 2010.
Plástico blanco	Inzunza-Ibarra <i>et al.</i> , 2010; Lara-Capistrán <i>et al.</i> , 2021; Mayolo, 2015; Montemayor <i>et al.</i> , 2018a; Robledo-Torres <i>et al.</i> , 2010; Torres-Bojorques <i>et al.</i> , 2017.
Plástico verde	Inzunza-Ibarra <i>et al.</i> , 2010; Mayolo, 2015; Robledo-Torres <i>et al.</i> , 2010),
Plástico plata	Barajas-Guzmán y Barradas, 2011; Inzunza-Ibarra <i>et al.</i> , 2017; Montemayor <i>et al.</i> , 2018a; Munguía-López <i>et al.</i> , 2011; Torres-Bojorques <i>et al.</i> , 2017.
Plástico cristalino	Mayolo, 2015
Plástico amarillo	Chopra y Koul, 2020; Torres-Bojorques <i>et al.</i> , 2017
Plástico naranja	Chopra y Koul, 2020

mediano (Pfeiffer *et al.*, 2016), café (Acheampong *et al.*, 2019), restos vegetales (Shumova, 2018), astillas o virutas de madera (Zribi *et al.*, 2015a),

**Tabla 3.** Tipos de acolchados de origen biodegradable

Acolchado con componentes biodegradables	Autores
Plástico biodegradable de lignina	Sirivechphongkul <i>et al.</i> , 2022
Hemicelulosa, b-ciclodextrina, alginato	Zhang <i>et al.</i> , 2023
Almidón	Anzalone <i>et al.</i> , 2010
Almidón y poliéster	Reid <i>et al.</i> , 2022

hojas de pino (Zribi *et al.*, 2015a), corteza de árboles (Zribi *et al.*, 2015a), cascara de cacao (Zribi *et al.*, 2015a), corteza de pino (Zribi, 2011), madera triturada (Hannam *et al.*, 2016a), pasto (Prosdocimi *et al.*, 2016a), y alfalfa (Chopra y Koul, 2020). Dentro de los orgánicos podemos mencionar además los acolchados de otros materiales entre los que destacan: los de tipo pulverización de solución acuosa (polisacáridos naturales) (Schettini *et al.*, 2012), periódico (Ghouse, 2020), pulverización de proteínas hidrolizadas (Schettini *et al.*, 2012), geotextil (Zribi, 2011), estiércol (Obalum *et al.*, 2011), aserrín de pino (Chopra y Koul, 2020), y algas marinas (Chopra y Koul, 2020). Por otro lado, en cuanto a los acolchados inorgánicos se destaca el uso de plásticos de diversas coloraciones, destacando los acolchados plásticos de color negro (Tabla 2).

### Usos de los acolchados y sus efectos en los componentes del balance hídrico superficial

Los componentes del ciclo hidrológico (precipitación, escurrimiento, infiltración, evaporación y evapotranspiración) forman parte importante en el buen desarrollo de diversas actividades en una cuenca, estos componentes dependen de las características climáticas, topográficas y geográficas, la alteración en alguno de estos componentes afecta la disponibilidad de agua a tal grado que se ven afectadas las actividades económicas, industriales, sociales y además de lo anterior, ocurren daños en los ecosistemas. Por lo anterior, la agricultura se encuentra dentro de las actividades de mayor impacto hablando del desequilibrio en el balance hídrico, debido a que requiere una cantidad considerable de agua. Es así como el estrés hídrico tiene mayor afectación en zonas áridas o semiáridas, siendo de vital im-

portancia la implementación de metodologías que disminuyan estas afectaciones, tal es el caso del uso de los diversos tipos de acolchados.

### Efecto sobre la evapotranspiración

Al hablar de la interacción de los acolchados con la evapotranspiración (ET), la ET es definida como la combinación de dos procesos separados por los que se tiene pérdida de agua, a través de la superficie del suelo por efecto de la evaporación y por otra parte mediante la transpiración del cultivo. En estudios del análisis del efecto del uso de acolchados en cultivos sobre la evapotranspiración, Patril *et al.* (2018), han observado una disminución en la evapotranspiración mediante el uso de acolchado plástico que sin acolchado, contribuyendo con ello al aumento de la resistencia a la difusión del vapor en la interfaz suelo y aire parcialmente cubierta por una película de plástico (Patril y Tiwari, 2018). Sun *et al.* (2012) encontraron que los acolchados de concreto y de película plástica presentan un mayor impacto que el acolchado de paja en la reducción del uso de agua, logrando mantener una tasa máxima de transpiración diaria de 3-3.5 mm por día. También se ha encontrado que la ET en las tiras de maíz fue significativamente mayor que en las tiras de trigo, lo que explicó por la fuerte transpiración del maíz en el período de crecimiento vigoroso (Yin *et al.*, 2016). La ET total durante toda la temporada de crecimiento del maíz varió en el rango de 406 a 466 y de 284 a 404 mm en el periodo estudiado comprendido entre 2013 y 2014, respectivamente, empleando acolchado plástico transparente (Li *et al.*, 2018). Aplicando tratamientos de acolchado, la ET fue menor (promedio de 59.8 mm en 2013-2014 y 61.1 mm en 2014-2015) que bajo tratamiento sin acolchar en ambos años (Yan *et al.*, 2018).

### Efecto sobre la evaporación

La evaporación depende de diversos factores meteorológicos entre los que pueden mencionarse, la velocidad del viento, la presión atmosférica, la humedad y la temperatura entre otros (Zribi *et al.*, 2015). Todos estos factores son de importancia y son generalmente evaluados cuando se usan acolchados en la agricultura. Se ha observado que afectan la

variación de la temperatura provocando su aumento o disminución. De acuerdo con lo reportado por Feng *et al.* (2015), la temperatura media del suelo cubierto por acolchado poroso disminuyó en 1.55 °C en comparación con el uso de un acolchado tradicional de plástico (polietileno) y así mismo, se incrementó en 1.09 °C y 2.59 °C en comparación con la tierra desnuda (sin acolchado) y la paja (como acolchado orgánico), respectivamente.

Otra variable de importancia a considerar en el uso de los acolchados, es el color; algunos estudios han determinado que el uso de un acolchado plástico negro, incrementa en 1.2 °C la temperatura mínima diaria promedio y reduce 43% la amplitud de la temperatura del suelo diaria promedio, con respecto al uso de un acolchado plástico de color plata (1.6 °C) ambos, en relación con el tratamiento sin acolchar (Inzunza-Ibarra *et al.*, 2010). Por su parte, el trabajo realizado por Lara-Capistran *et al.* (2021), observaron que la cubierta plástica de color blanco refleja el 62% del espectro total de radiación visible en radiación fotosintéticamente activa comparada con los acolchados de color oscuro. Inzunza-Ibarra *et al.* (2017), mostraron que la variación de la temperatura es dependiente del color del acolchado usado en el cultivo y además, está relacionada con los procesos fisiológicos en los que están involucrados la absorción de agua y nutrientes.

Los acolchados, tanto plásticos como de origen orgánico, tienen efecto en los valores de evaporación y aumenta el almacenamiento de agua en el suelo en relación con la práctica convencional en 38-71 mm (Zhang *et al.*, 2016). En el estudio realizado por Lin *et al.* (2016), el acolchado de película plástica aumenta la temperatura y reduce la evaporación del suelo en mayor proporción que el acolchado de paja; además de lo anterior, observaron un incremento en el rendimiento del cultivo. Sin embargo, para el caso el acolchado de paja este rendimiento fue mucho menor e inestable; atribuyendo estos cambios, a la influencia de la aplicación del acolchado en los tiempos de crecimiento del cultivo así como, en la inestabilización por la degradación del acolchado orgánico (Lin *et al.*, 2016).

Una de las desventajas con el uso de los acolchados plásticos en cultivos, son los residuos que

pueden generar al fin de su vida útil, fragmentándose y mezclándose con el suelo, dificultando su eliminación. Derivado de lo anterior, varias investigaciones se han realizado, enfocándose al uso de acolchados plásticos de base biológica (proteínas, almidones, azúcares), los cuales contribuyen a una mejor degradación y presentan una evaporación más homogénea (Schettini *et al.*, 2012). Respecto a los acolchados biodegradables, Briassoulis *et al.* (2019), analizaron las propiedades de este tipo de plásticos basados en poliésteres aromáticos y almidón determinando que tienen efectos positivos en la permeabilidad del vapor.

A continuación, nos referimos a la segunda parte del trabajo, en que se realizaron pruebas a nivel experimental para la aplicación de ecolásticos como acolchados.

## **Materiales y métodos**

Se usó bagazo de maguey *Salmiana* (**Figura 1a**), fécula de maíz (**Figura 1b**), ácido acético y glicerina de grado comercial.

### **Preparación del bagazo**

- Se lavó el bagazo para eliminar un poco de polvo o residuos.
- Después de lavado se molió hasta disminuir el tamaño de partícula.
- Posteriormente se tamizó hasta un tamaño de partícula de 200 mm.

### **Elaboración de los plásticos**

Se variaron los componentes para el desarrollo de los plásticos a nivel experimental, los cuales consistieron en fécula de maíz, glicerina, ácido acético y agua (**Tabla 4**) para analizar características físicas, % de humedad y % de absorción de agua. Cada una de las mezclas fueron llevadas a calentamiento a 80 °C, posteriormente la mezcla fue extendida en una superficie para secarse a temperatura ambiente durante 24 horas.

### **Porcentaje de humedad y absorción de agua**

Para el porcentaje de humedad se pesaron 0.3 g de cada una de las muestras de plástico por triplicado, posteriormente se secaron durante 24 horas a 50 °C.



**Figura 1.** a) Bagazo de magüey b) Fécula de maíz

Finalmente se pesaron las muestras y se realizaron los cálculos correspondientes. Para la determinación del % de absorción de agua a las muestras anteriores se agregó 20 mL de agua destilada y se mantuvieron a temperatura ambiente durante 20 horas, después de este tiempo se pesaron las muestras para determinar los cálculos correspondientes.

### Diseño experimental

Se llevó a cabo un diseño completamente aleatorizado de un factor para evaluar el efecto de cin-

co mezclas (Descritas en la **Tabla 4**) diferentes de ecoplásticos, sobre los porcentajes de humedad y absorción de agua (variables de respuestas). Los ecoplásticos son evaluados para su uso como acolchados. Los resultados se llevaron a cabo por cuadruplicados.

### Análisis estadístico

Los datos obtenidos de los porcentajes de humedad y absorción de agua de las diferentes mezclas de ecoplásticos evaluados, no cumplieron con los

**Tabla 4.** Variación de componentes para el desarrollo de plásticos

Tratamientos	ID	Fécula de maíz	Glicerina	Ácido acético	H <sub>2</sub> O	Bagazo
		g	mL	mL	mL	g
1.30gM.0.3b.20mLg.5mLa.180mLa	M1	30	20	5	180	0.3
2.30gM.0.3b.20mLg.10mLa.180mLa	M2	30	20	10	180	0.3
3.30gM.0b.20mLg.10mLa.180mLa	M3	30	20	10	180	0
4.30gM.1b.20mLg.5mLa.180mLa	M4	30	20	5	180	1
5.40gM.0b.20mLg.10mLa.100mLa	M5	40	30	10	100	0

supuestos de la estadística paramétrica. Por lo tanto, se procedió a realizar un análisis de Kruskal-Wallis, seguido de pruebas de contraste múltiple de Mann-Whitney para determinar diferencias estadísticamente significativas entre las medianas.

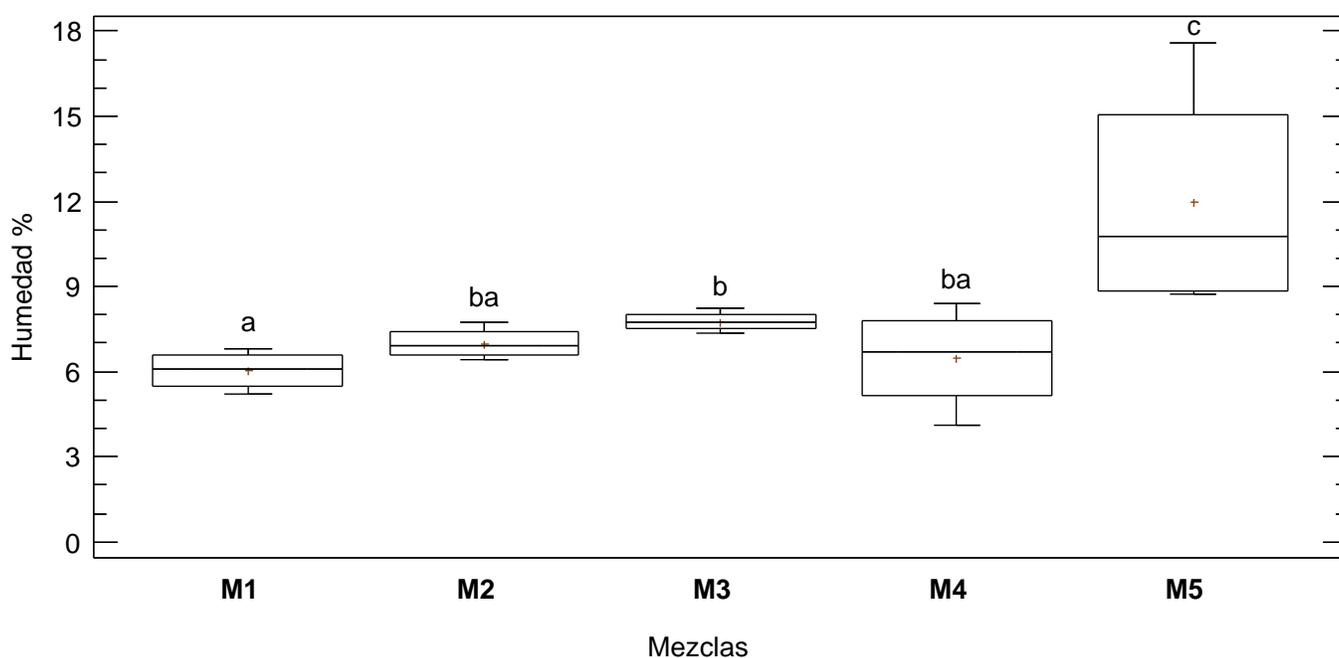
## Resultados y discusión

### Porcentajes de humedad y absorción de agua de las mezclas de los ecoplásticos evaluados

El análisis de Kruskal-Wallis de una vía indica que existen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.01$ ) con un 95% de confianza entre las medianas de los % de humedad y absorción de agua de los diferentes tratamientos de mezclas de ecoplásticos evaluados M1 (1.30gM. 0.3b.20mLg.5mLa.180mLa), M2 (2.30gM. 0.3b.20mLg.10mLa.180mLa), M3 (3.30gM.0b. 20mLg.10mLa.180 mLa), M4 (4.30gM.1gb. 20mLg. 5mLa.180 mLa), M5 (5.40gM.0gb.30mLgl.10mLa.100 mLa). El contraste de medianas de Mann-Whitney reveló diferencias entre los distintos tratamientos, representados por letras diferentes. El tratamiento que mostró la mediana más alta en cuanto al % humedad fue M5 (5.40gM.0gb.30mLgl.10mLa.100

mLa), con un valor de 10.767 % ( $\pm Q1 = 8.847$ ,  $Q2 = 15.079$ ), seguidos por los tratamientos M3 (3.30gM.0b. 20mLg.10mLa.180 mLa), M2 (2.30gM. 0.3b.20mLg.10mLa.180mLa) y M4 (4.30gM.1gb. 20mLg. 5mLa.180 mLa), con valores de 7.738 % ( $\pm Q1 = 7.525$ ,  $Q2 = 7.996$ ), 6.9089 % ( $\pm Q1 = 6.589$ ,  $Q2 = 7.394$ ) y 6.67385 % ( $\pm Q1 = 5.136$ ,  $Q2 = 7.783$ ), respectivamente. El tratamiento M1 (1.30gM. 0.3b.20mLg.5mLa.180mLa), presentó el valor mediano más bajo del % de humedad con 6.067 % ( $\pm Q1 = 5.4941$ ,  $Q2 = 6.595$ ) (**Figura 2**).

Con respecto la % de absorción de agua, los tratamientos que mostraron las medianas más altas fueron M1 (1.30gM. 0.3b.20mLg.5mLa.180mLa) y M2 (2.30gM. 0.3b.20mLg.10mLa.180mLa), con valores de 62.2567% ( $\pm Q1 = 61.478$ ,  $Q2 = 62.963$ ) y 61.5109 ( $\pm Q1 = 58.852$ ,  $Q2 = 75.600$ ), respectivamente, seguidos por los tratamientos M4 (4.30gM.1gb. 20mLg. 5mLa.180 mLa) y M3 (3.30gM.0b. 20mLg.10mLa.180 mLa), con valores de 53.006% ( $\pm Q1 = 51.344$ ,  $Q2 = 54.668$ ) y 52.887% ( $\pm Q1 = 46.499$ ,  $Q2 = 58.713$ ), respectivamente. El valor mediano más bajo del % de absorción de agua se observó en el tratamiento M5 (5.40gM.0gb.30mLgl.10mLa.100 mLa), con 37.238% ( $\pm Q1 = 33.701$ ,  $Q2 = 40.774$ ) (**Figura 3**).



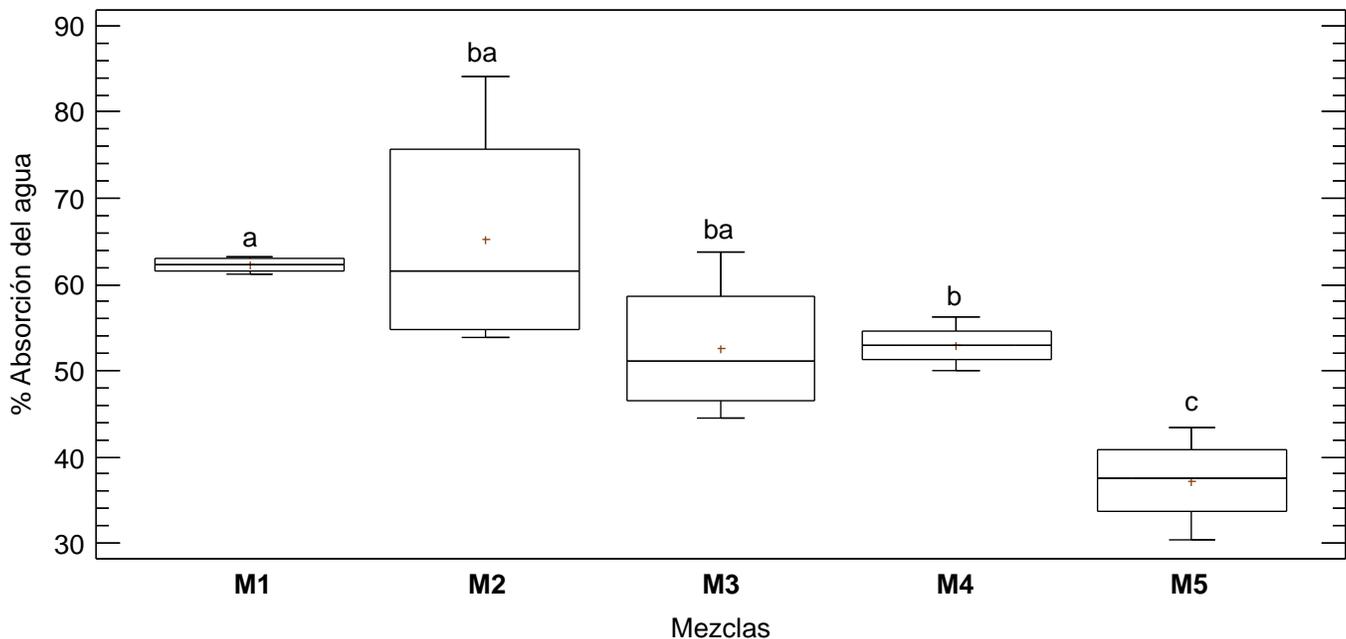
**Figura 2.** Valores medianos ( $\pm Q1 =$  cuartil inferior,  $Q2 =$  cuartil superior) de la variable humedad (%) de los diferentes tratamientos de mezcla de ecoplásticos empleados.

En este estudio experimental se pudo determinar la importancia de los acolchados en los procesos de evaporación y evapotranspiración. Los bioplásticos se han desarrollado de manera más común a partir de fécula de maíz y como plastificante la glicerina y el ácido acético, buscando con ello mejorar las características de los ecoplásticos. Los acolchados ayudan a mantener la humedad del suelo por lo que las características de los acolchados deben ser de carácter hidrofóbico es decir tener baja humedad (Sirivechphongkul *et al.*, 2022).

### Conclusiones

En este artículo se presenta en primera instancia una revisión sobre la importancia potencial que tienen los acolchados para la retención de agua en los cultivos, y en una segunda fase se realizó un trabajo de investigación que se elaboraron 5 mezclas de ecoplásticos, a nivel laboratorio, utilizando almidón de maíz, glicerina, ácido acético y bagazo de agave a diferentes composiciones, para su uso como acolchados plásticos en la agricultura y evaluar su efecto en el proceso de evaporación. El análisis de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.01$ ) con un 95 % de confianza entre las medianas de los porcentajes de humedad

y porcentajes de absorción de agua en mezclas de ecoplásticos evaluados. Mientras que, el contraste de medianas de Mann-Whitney reveló diferencias entre los distintos tratamientos, mostrando la mediana más alta en el porcentaje de humedad para el tratamiento M5 con un valor de 10.767 % ( $\pm Q1 = 8.847$ ,  $Q2 = 15.079$ ) y el más bajo para M1 con 6.067 % ( $\pm Q1 = 5.4941$ ,  $Q2 = 6.595$ ). De forma contraria, respecto al porcentaje de absorción de agua, fue M1 con 62.2567 % ( $\pm Q1 = 61.478$ ,  $Q2 = 62.963$ ) el que mostró el valor mediano más alto y M5 el valor mediano más bajo con 37.238 % ( $\pm Q1 = 33.701$ ,  $Q2 = 40.774$ ), lo anterior puede deberse a las características del material, el cual ya tiene un alto contenido de humedad por su naturaleza, y por lo tanto ya no puede absorber más agua. Estos hallazgos respaldan la relevancia de los ecoplásticos como una alternativa en prácticas agrícolas, con lo cual la relación de las mezclas de los ecoplásticos obtenidos con las características mecánicas permitirán determinar las condiciones físicas deseadas en su uso como acolchados. Por ello, es importante el continuar con investigaciones respecto al efecto del acolchado en la evaporación, de tal manera que sea un elemento de conservación de agua al evitar de forma constante la pérdida de



**Figura 3.** Valores medianos ( $\pm Q1 =$  cuartil inferior,  $Q2 =$  cuartil superior) de la variable % de absorción de agua de los diferentes tratamientos de mezcla de ecoplásticos empleados.

agua representada por la humedad y a su vez que se cumpla con la característica de ser biodegradables y ser competitivos con los acolchados plásticos que actualmente se utilizan y que representan un grave problema de contaminación ambiental.

## Agradecimientos

A la Universidad de Guanajuato por el financiamiento del proyecto de investigación. A los estudiantes Brandon Alexis García Almanza y Rodrigo Juárez Balderas por su apoyo en el desarrollo del proyecto de investigación.

## Referencias

- Achampong K, Daymond AJ, Adu-Yeboah P, Hadley P (2019), Improving field establishment of cacao (*Theobroma cacao*) through mulching, irrigation and shading. *Experimental Agriculture* 55(6):898-912. doi:10.1017/S0014479718000479
- Anzalone A, Cirujeda A, Aibar J, Pardo G, Zaragoza C (2010), Effect of biodegradable mulch materials on weed control in processing tomatoes. *Weed Science Society of America* 24(3):369-377. doi:10.1614/WT-09-020.1
- Barajas-Guzmán MG, L. Barradas V (2011), Microclimate and sapling survival under organic and polyethylene mulch in a tropical dry deciduous forest. *Botanical Sciences* 88:27-35. doi:10.17129/botsci.303
- Brar AS, Buttar GS, Thind HS, Singh KB (2019), Improvement of water productivity, economics and energetics of potato through straw mulching and irrigation scheduling in Indian Punjab. *Potato Research* 62(4):465-484. doi:10.1007/s11540-019-9423-6
- Briassoulis D, Giannoulis A (2018), Evaluation of functionality of bio-based plastic mulching films. *Polymer Testing* 67:99 - 109. doi:10.1016/j.polymertesting.2018.02.019
- Chopra M, Koul B (2020), Comparative assessment of different types of mulching in various crops: A review. *Plant archives* 20(2):1620-1626. ISSN:0972-5210.
- Feng LS, Sun ZX, Yan CR, Zheng MZ, Zheng JM, Yang N, Bai W, Feng C (2015), Effect of farmland surface covered porous mulch materials on soil water, heat and water use efficiency of maize. *Journal Animal Plant Sciences* 25:22-27.
- Gao Y, Xie Y, Jiang H, Wu B, Niu J (2014), Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. *Field Crops Research* 156:40-47. doi:10.1016/j.fcr.2013.10.016.
- Hueso-González P, Martínez-Murillo JF, Ruiz-Sinoga JD (2017), Beneficios de los acolchados de paja y poda como prácticas para la gestión forestal de los montes mediterráneos. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 43(1):189-208. doi:10.18172/cig.3142.
- Inzunza-Ibarra MA, Catalán-Valencia EA, Villa-Castorena M, López-López R, Sifuentes-Ibarra E (2017), Respuesta del tomate a tipos de acolchado plástico y niveles de riego con cinta. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40(1):9-16. doi:10.35196/rfm.2017.1.9-16.
- Inzunza-Ibarra MA, Villa-Castorena M, Catalán-Valencia EA, Román-López A (2010), Extracción de nutrientes y producción de chile jalapeño bajo acolchado plástico y niveles de riego. *Terra Latinoamericana* 28(3):211-218.
- Jun F, Yu G, Quanju W, Malhi SS, Yangyang L (2014), Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China. *Agricultural Water Management* 138:10-16. doi:10.1016/j.agwat.2014.02.018.
- Lahoz I, Macua JI, Cirujeda A, Aibar J, León AIM, Pardo G, Suso M, Moreno MM, Moreno C, Mancebo I (2014), Influencia del acolchado biodegradable en la producción de pimiento. 6.
- Lara-Capistrán L, Zulueta-Rodríguez R, Reyes-Pérez JJ, Murillo-Amador B, Ledea-Rodríguez JL, Hernández-Montiel LG (2021), Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a calabaza italiana (*Cucurbita pepo* L.) bajo acolchado plástico en campo. *Terra Latinoamericana* 3:1-11. doi:10.28940/terra.v39i0.834.
- Li Q, Li H, Zhang L, Zhang S, Chen Y (2018), Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis. *Field Crops Research* 221:50-60. doi:10.1016/j.fcr.2018.02.017.
- Lin W, Liu W, Xue Q (2016). Spring maize yield, soil water use and water use efficiency under plastic film and straw mulches in the Loess Plateau. *Scientific Reports* 6(1):1-10. doi: 10.1038/srep38995.
- Loera-Alvarado LA, Torres-Aquino M, Martínez-Montoya JF, Cisneros-Almazán R, and Martínez Hernández J de J. (2019), Calidad del agua de escorrentía para uso agrícola captada en bordos de almacenamiento. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6(17):283-295. doi:10.19136/era.a6n17.1867
- Montemayor Trejo JA, Suárez González E, Munguía López JP, Segura Castruita MÁ, Mendoza Villarreal R, Woo Reza JL (2018), Acolchados plásticos para la producción de maíz (*Zea mays* L.) forrajero en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 20:4107-4115. doi:10.28940/terra.

v39i0.834

Patil A, Tiwari KN (2018), Evapotranspiration and crop coefficient of Okra under subsurface drip with and without plastic mulch. *Current Science* 115(12):2249-2257. doi:10.18520/cs/v115/i12/2249-2258.

Prosdocimi M, Tarolli P, and Cerdà A (2016), Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth-Science Reviews* 161:191-203. doi:10.1016/j.earscirev.2016.08.006

Rao Z-X, Huang D-Y, Zhu H-H, Zhu Q-H, Wang J-Y, Luo Z-C, Xu C, Shen X, He Y-B. (2016). Effect of rice straw mulching on migration and transportation of Cd, Cu, Zn, and Ni in surface runoff under simulated rainfall. *Journal of Soils and Sediments* 16(8):2021-2029. doi:10.3390/w14162471.

Reid EV, Samuelson MB, Blanco-Canqui H, Drijber R, Kadoma Wortman SE (2022), Biodegradable and biobased mulch residues had limited impact on soil properties but reduced yield of the following crop in a low fertility soil. *Renewable Agriculture and Food System* 37:409-503. doi:10.1017/S1742170522000217.

Schettini E, Sartore L, Barbaglio M, Vox G (2012), Hydrolyzed protein based materials for biodegradable spray mulching coatings. *Acta Horticulturae* 952:359-366. doi:10.17660/ActaHortic.2012.952.45.

Sirivechphongkul K, Chiarasumran N, Saisriyoot M, Thanapimmetha A, Srinophakun P, Iamsaard K, Lin Y-T (2022), Agri-biodegradable mulch films derived from lignin in empty fruit bunches. *Catalysts* 12:1150. doi:10.3390/catal12101150

Sun H, Shao L, Liu X, Miao W, Chen S, Zhang X (2012), Determination of water consumption and the water-saving potential of three mulching methods in a jujube orchard.

*European Journal of Agronomy* 43:87-95. doi:10.1016/j.eja.2012.05.007

Wu HX, Zhang Y, Wang L, Chen D, Ma C (2019), Effect of infiltration head on soil water movement of small-diameter tube outflow furrow irrigation under mulch film. *World Journal of Engineering* 16(2):232-237. doi:10.1108/WJE-10-2017-0332.

Yan Q, Dong F, Lou G, Yang F, Lu J, Li F, Zhang J, Li J, Duan Z (2018), Alternate row mulching optimizes soil temperature and water conditions and improves wheat yield in dryland farming. *Journal of Integrative Agriculture* 17(11):2558-2569. doi: 10.1016/S2095-3119(18)61986-0

Yin W (2016), Integrated double mulching practices optimizes soil temperature and improves soil water utilization in arid environments. *International Journal Biometeorology* 15:1423-1437. doi:10.1007/s00484-016-1134-y.

Zhang S, Yang X, Lovdahl L (2016), Soil management practice effect on water balance of a dryland soil during fallow period on the Loess Plateau of China. *Soil and Water Research* 11(1):64-73. doi:10.17221/255/2014-SWR.

Zheng J, Fan J, Zhang F, Yan S, Guo J, Chen D, Li Z (2018). Mulching mode and planting density affect canopy interception loss of rainfall and water use efficiency of dryland maize on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land* 10(5):794-808. doi:10.1007/s40333-018-0122-y.

Zribi W (2011), Efectos del acolchado sobre la humedad, temperatura, estructura y salinidad de suelos agrícolas. *Información Técnica Económica Agraria* 107:16. 148-162.

Zribi W, Aragüés R, Medina E, Faci JM (2015), Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control. *Soil and Tillage Research* 148:40-45. doi:10.1016/j.still.2014.12.003.



# Confiabilidad en las técnicas colorimétricas para la determinación de sólidos suspendidos como parámetros de calidad del agua

## Reliability in the colorimetric techniques for determination of suspended solids as water quality parameters

Itzel Luviano Soto<sup>1\*</sup>, Yajaira Concha Sánchez<sup>1</sup>, Bertha Alejandra Olmos Navarrete<sup>1</sup>, Gabriel Arroyo Correa<sup>2</sup>, José Vega Cabrera<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Mújica, Col. Felicitas del Río C.P. 58040, Morelia, Michoacán.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Mújica, Col. Felicitas del Río C.P. 58040, Morelia, Michoacán.

### Historial

Manuscrito recibido: 1 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Itzel Luviano Soto

e-mail: itzel.luviano@umich.mx

### Resumen

Los sólidos suspendidos son un parámetro de calidad del agua que se obtiene por pruebas de laboratorio, las cuales suelen ser costosas, sin embargo, existen métodos alternativos como las pruebas colorimétricas. El presente trabajo tiene como objetivo la determinación de la confiabilidad de estas técnicas, para esto se realizó un estudio colorimétrico de 20 muestras a cuatro longitudes de onda. Posteriormente, se realizó una simulación de Monte Carlo para determinar la confiabilidad de este método a partir de medidas de sensibilidad. Las técnicas colorimétricas permitieron una adecuada predicción de la concentración de sólidos suspendidos mediante el análisis de la absorbancia, esto se refleja a partir de los valores de regresión obtenidos. El modelo se puede mejorar con más datos generados de forma experimental, así como la simulación de Monte Carlo.

**Palabras clave:** calidad del agua, sensibilidad e incertidumbre, simulación de Monte Carlo, colorimetría, sólidos suspendidos.

### Introducción

Para la correcta evaluación de la calidad del agua es necesario determinar las concentraciones de diferentes agentes contaminantes que están en ella, denominados parámetros de contaminación, y que se utilizan como referencia para determinar propiedades físicas, químicas y/o biológicas (Secretaría

### Abstract

The analysis of suspended solids is a water quality parameter obtained through laboratory tests, which usually is expensive. However, there are alternative methods such as colorimetric tests. The goal of this work was to determine the reliability of this alternative technique, for this, a colorimetric study was conducted through testing 20 samples at four wavelengths. Subsequently, a Monte Carlo simulation was performed to determine the reliability of this method based on sensitivity measurements. The colorimetric techniques allowed an adequate prediction of the concentration of suspended solids through the analysis of the absorbance reflected from the regression values obtained. The model can be further improved with more data generated experimentally, as well as the Monte Carlo simulation.

**Keywords:** water quality, sensitivity and uncertainty, Monte Carlo simulation, colorimetry, suspended solids.

del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022). Dentro de los parámetros más comunes evaluados se encuentran los sólidos inmersos, en donde la cantidad de sólidos suspendidos totales disminuye la calidad de los cuerpos de agua. Altas concentraciones de sólidos suspendidos totales hacen que aumente la turbidez y la temperatura, disminuyen

los niveles de oxígeno disuelto, así como la luz inmersa, dificultando el proceso de fotosíntesis. Todo lo anterior puede provocar la muerte de organismos marinos, así como generar mal sabor, olor y color (Tchobanoglous *et al.*, 2002).

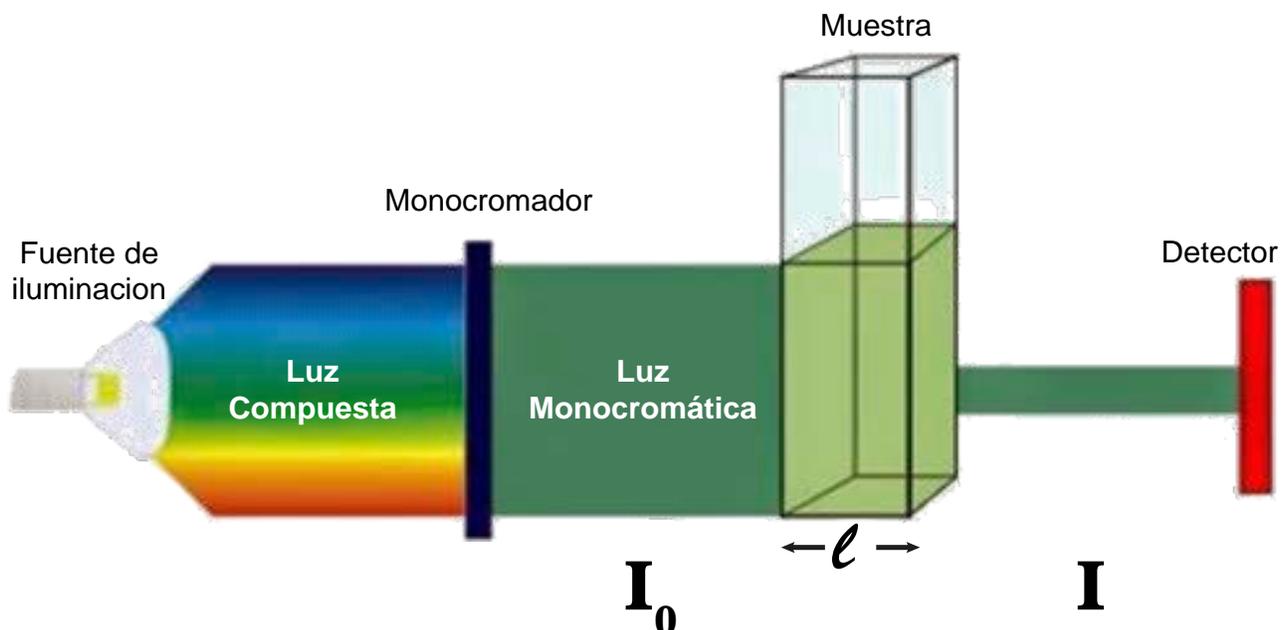
Por lo anterior, la determinación de los sólidos suspendidos totales como parámetro de la calidad del agua es de gran importancia, no obstante, el análisis de dichos parámetros implica costosas y tardadas pruebas de laboratorios. Con esta base, nuestro trabajo tiene como objetivo la determinación indirecta de los Sólidos Suspendidos Totales (SST), principalmente aquellos de origen inorgánico, a partir de pruebas colorimétricas basadas en la capacidad que tienen las moléculas para absorber las radiaciones electromagnéticas, incluyendo el espectro en la región UV-Visible-IR, por lo que dicha técnica constituye un valioso instrumento para la determinación y caracterización de sustancias a partir de la ley de Lambert-Beer.

La colorimetría es una técnica de detección de color que se fundamenta en el hecho de que toda materia responde al estímulo ocasionado por ondas electromagnéticas (luz), como se muestra en la **Fig. 1** (Herrera, 2017). Esta técnica consiste en irradiar la muestra con luz monocromática de intensidad

inicial ( $I_0$ ), la cual, absorbe cierta cantidad de luz, y la luz transmitida  $I$  se mide a la salida mediante un detector.

Dado que la absorbancia se utiliza comúnmente como una herramienta experimental para la caracterización de sustancias en estudios de concentración, esta puede ser una técnica con fuentes de incertidumbre, por lo que la aplicación de un análisis de confiabilidad es esencial para identificar los aspectos críticos del modelo que afectan la incertidumbre de este.

Las técnicas de sensibilidad utilizadas para determinar la confiabilidad de un modelo, se pueden clasificar como técnicas de análisis diferencial (sensibilidad local), análisis de Monte Carlo (sensibilidad global), Test de Amplitud de Sensibilidad de Fourier FAST (sensibilidad global) y una metodología de superficie de respuesta (sensibilidad global) (Saltelli y Ratto, 2008). Actualmente, existen diferentes estrategias para realizar un análisis de confiabilidad. En este trabajo se optó por la utilización de regresión y correlación como medidas de sensibilidad e incertidumbre para determinar la confiabilidad a partir de la ley de Lambert Beer como modelo de determinación de concentración de SST aplicando las Simulaciones de Monte Carlo, ya que



**Figura 1.** Esquema básico para medidas colorimétricas.

a lo largo del tiempo, se han desarrollado estudios de varios métodos de sensibilidad e incertidumbre (e.g. Iman y Helton, 1985, 1988; Saltelli y Marivoet, 1990; Saltelli y Homma, 1992; Saltelli *et al.*, 1993 y Pappenberger *et al.*, 2006), en los cuales se demuestra que con pruebas de sensibilidad basadas en múltiples simulaciones, tales como la Simulación de Monte Carlo (MCS) conlleva a análisis más robustos, efectivos y flexibles. El método de análisis MCS implica un muestreo de un rango de las variables de entrada seguidas por el modelo de evaluaciones para los valores muestreados, después de lo cual se utiliza la regresión y las medidas de sensibilidad basadas en la correlación que se pueden calcular.

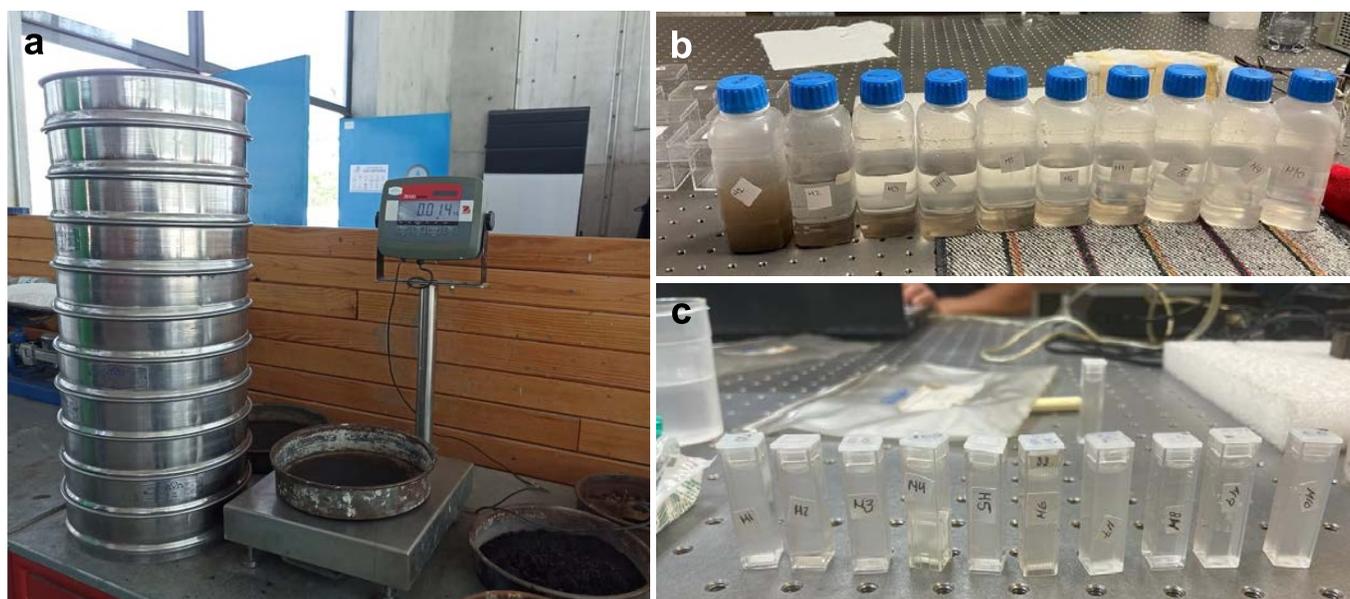
El análisis de confiabilidad de este trabajo se basa en el análisis de sensibilidad basado en la MSC. Este análisis está limitado a la influencia de la incertidumbre del resultado del modelo propuesto, sin embargo, esta incertidumbre y sensibilidad se pueden determinar mediante varias medidas de correlación y regresión en la determinación de SST como parámetros de calidad del agua.

### Materiales y métodos

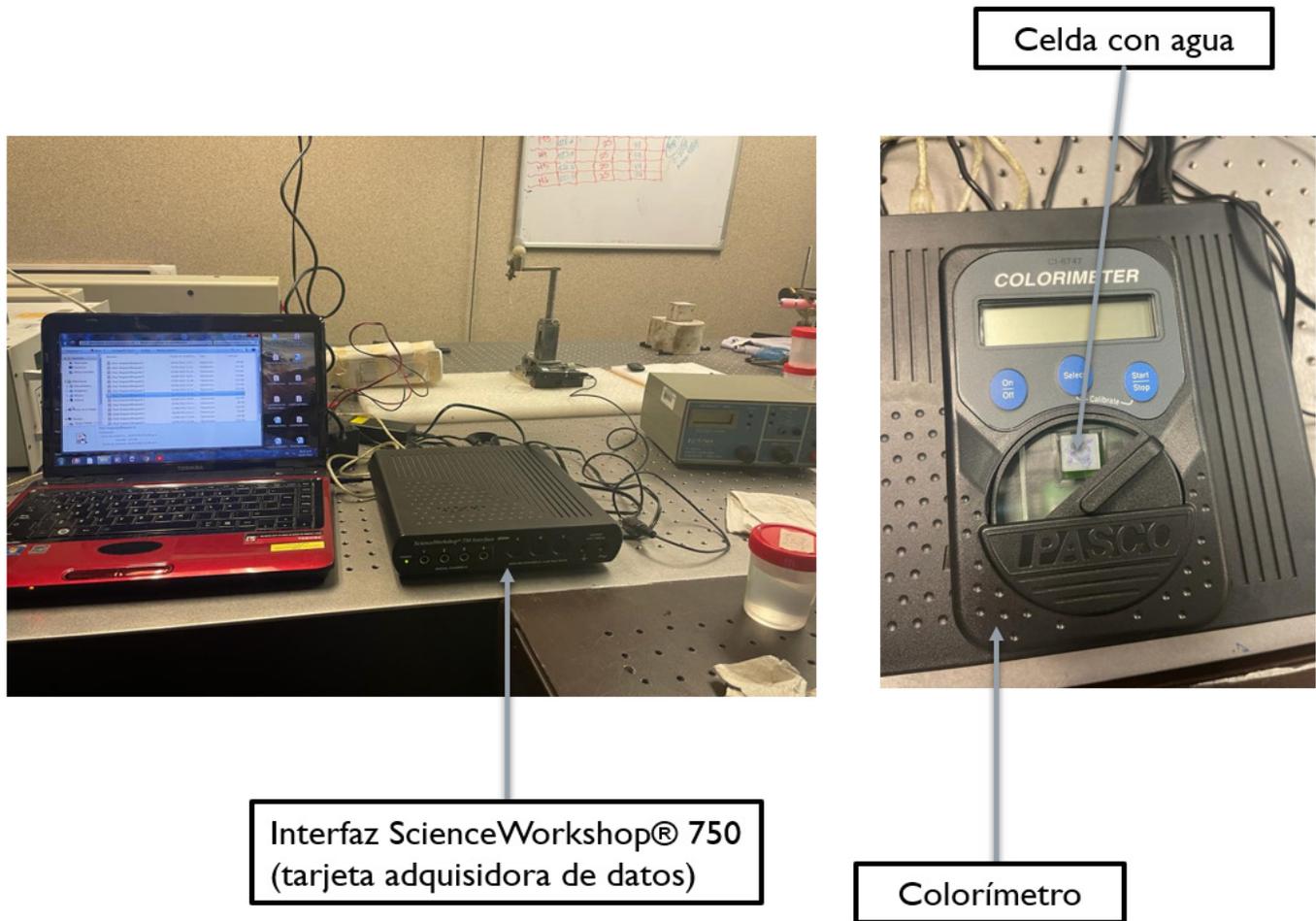
En este trabajo se analizaron veinte muestras de agua, formuladas a partir de agua destilada, considerada

como agua completamente pura, mezclada con sólidos suspendidos. Para los sólidos se trabajó con muestras de arcillas, constituidas principalmente de silicato hidratado de alúmina, este material fue granulométricamente seleccionado y tamizado por la malla granulométrica #200, obteniendo así material de 74 micrómetros aproximadamente (**Fig. 2a**). Este material se pesó en una báscula analítica con precisión de 0.1 mg, de ésta se obtuvieron 20 medidas del material (**Fig. 2b**). Posteriormente, se mezclaron con 200 mL de agua destilada para obtener muestras puras de agua con SST (**Fig. 2c**) y las arcillas se analizaron mediante pruebas colorimétricas usando la instrumentación PASCO mostrada en la **Fig. 3**. Se utilizó un colorímetro portátil marca PASCO CI-6747 que opera a cuatro longitudes de onda: rojo ( $\lambda=697$  nm), naranja ( $\lambda=630$  nm), verde ( $\lambda=565$  nm) y azul ( $\lambda=460$  nm) y se calibra para cada longitud de onda con una celda de polipropileno con agua destilada. Los resultados se capturaron con el software CAPSTONE® de PASCO y las mediciones se llevaron a cabo en 4 sesiones para disminuir la propagación de errores. Las muestras se refrigeraron a 4 °C para su manejo y conservación por el periodo en que se llevó a cabo el estudio.

Una vez capturadas las muestras de las cuatro



**Figura 2.** a) Prueba granulométrica para obtención de sólidos, b) Preparación de muestras, c) Celdas utilizadas para las muestras colorimétricas.



**Figura 3.** Instrumentación para las pruebas colorimétricas.

sesiones de prueba, se obtuvieron las absorbancias. Los resultados de cada onda se promediaron, estas absorbancias se vincularon con cada concentración de SST, dado que dependen de la longitud de onda del coeficiente de extinción, los resultados de cada onda se promediaron, esto en base a la ley empírica de Lambert-Beer que establece la relación entre estas intensidades, a partir de la cual se puede definir la transmitancia  $T$  dada en la Eq. (1) y la absorbancia Eq. (2).

$$T = \frac{I}{I_0} = 10^{-\epsilon cl} \quad (1)$$

donde  $\epsilon$  es el coeficiente de extinción,  $c$  es la concentración de la sustancia y  $l$  es el ancho del medio, conocido como camino óptico. Además, de la fórmula de la ley de Lambert-Beer se puede

deducir la siguiente ecuación que permite calcular la absorbancia (Herrera, 2017) a partir del análisis de la intensidad de luz transmitida y esparcida que se originan al incidir un haz de luz. El fundamento con el cual se basa el cálculo de la concentración de partículas se halla en el uso de la ley de Bouguer-Lambert-Beer y la teoría de esparcimiento de Mie. La propuesta del equipo lleva por nombre EMETEL (Equipo de Medición para el Estudio de la Transmitancia y el Esparcimiento de Luz):

$$A = \epsilon_{\lambda} cl \quad (2)$$

en donde  $\epsilon_{\lambda}$  es un parámetro que depende de las propiedades de la sustancia diluida y de la longitud de onda de la luz incidente. La medición de la absorbancia  $A$ , Ec. (2), es comúnmente utilizada como una herramienta para la caracterización de sustan-

cias en estudios de colorimetría o de espectrofotometría (van Loosdrecht *et al.*, 2019).

Para realizar la MCS las absorbancias resultantes se ajustaron a una función de distribución. Para ello se realizaron varias pruebas estadísticas para determinar el modelo probabilístico de mejor ajuste, este proceso se realizó mediante el método de máxima verosimilitud. Este método consiste en que dada  $f_x(X, \theta)$  que denote la función de densidad de probabilidad conjunta de un vector de variables aleatorias,  $X$  y  $\theta$ , el conjunto de los parámetros de la distribución, en este método se intenta estimar  $\theta$ , maximizando la probabilidad de ocurrencia de los eventos  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , cuando esta probabilidad está escrita como función de  $\theta$ . Para este propósito se define  $L(\theta)$  como una función que es proporcional a la probabilidad  $P(E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n)$ . En el caso especial en que los eventos  $E_1, E_2, \dots, E_n$  sean un conjunto de observaciones estadísticamente independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$  de una variable continua  $X$ , la función de verosimilitud se describe con la Eq. 3 (Montgomery y Runger, 2018):

$$L(\theta) \approx \prod_{i=1}^n f_X(x_i, \theta) \quad (3)$$

Posteriormente, se obtiene  $\theta$  como el valor que maximiza la función de verosimilitud, este proceso se llevó a cabo por métodos de optimización, en este trabajo se utilizó el método quasi-Newton “BFGS” en la obtención de parámetros de la distribución de ajuste.

El método BFGS, algoritmo de Broyden-Fletcher-Golfarb-Shannon, es uno de los métodos más efectivos en optimización, Eq. (4), ya que toma la forma general del método de Newton (Senocak, 2021):

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k B_k^{-1} \nabla f(x_k) \quad (4)$$

donde  $\alpha_k$  es un parámetro de búsqueda en línea,  $\nabla f(x_k)$  es el gradiente de la función  $f(x_k)$ ,  $B_k$  es una aproximación de la matriz Hessiana (derivada parcial de la matriz gradiente de la función global), la aproximación de esta matriz parte de la matriz identidad y a partir de un valor inicial se actualiza mediante el paso de Newton como se muestra en el algoritmo de la **Tabla 1** (Senocak, 2021):

El proceso de función de mejor ajuste se llevó a cabo en el software RStudio, en donde se obtuvieron los gráficos de distribución de probabilidad, los gráficos Q-Q, P-P y distribuciones acumuladas asociadas a diferentes distribuciones, también se realizaron pruebas de bondad de ajuste estadístico como las pruebas de Kolgomorov-Smirnov, Cramér-von Mises y Anderson-Darling, y los Criterios de Información de Akaike (AIC) y Criterio de Información Bayesiano (BIC).

Una vez seleccionada la función de densidad de mejor ajuste, se realizó la MSC para 10,000 muestras aleatorias a partir de los parámetros de ajuste obtenidos, la simulación se generó con valores aleatorios truncados entre  $[0, 100]$ , que son los valores que puede llegar a tener la absorbancia.

**Tabla 1.** Algoritmo BFGS para optimización.

$x_0 = \text{valor inicial}$	
$B_0 = \text{aproximación inicial del Hessiano}$	
for $k = 0, 1, 2 \dots$	
Solve $B_k s_k = \nabla f(x_k)$ for $s_k$	{Paso de quasi-Newton}
$x_{k+1} = x_k + s_k$	{actualización de la solución}
$B_{k+1} = B_k + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k}$	{aproximación actualizada del Hessiano}
end	

Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad e incertidumbre a partir de medidas de correlación y regresión lineal.

Para determinar las variables de sensibilidad e incertidumbre fue necesario ajustar un modelo lineal de los valores de colorimetría donde  $y = y_1, y_2, \dots, y_n$ , corresponden a los valores de salida de MCS, y  $X(N \cdot p)$  la matriz que contiene los valores de los parámetros de las variables de entrada del modelo para  $N$  simulaciones. En este caso el único parámetro determinado fue la absorbancia por lo que la matriz se convirtió en un vector:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{21} \\ \dots \\ x_{N1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Mediante la regresión por mínimos cuadrados del modelo de salida en la  $k$ -ésima simulación ( $k = 1, \dots, N$ ) y con la asociación de la muestra de parámetros, el modelo lineal puede ser descrito de la siguiente forma:

$$y(k) = b_0 + \sum_{i=1}^p b_i x_i(k) + e(k) = \hat{y}(k) + e(k) \quad (6)$$

donde  $y(k)$  y  $x_i$  son los valores de salida del modelo y los parámetros de entrada en la  $k$ -ésima simulación respectivamente,  $e(k)$  es la regresión residual,  $\hat{y}(k)$  es la regresión estimada en el modelo de salida y  $b_0, b_1, \dots, b_p$  son los Coeficientes de Regresión Lineal (ORC) obtenidos a partir de la minimización de la función de mínimos cuadrados  $F(b)$ .

$$F(b) = \sum_{k=1}^N \left[ y(k) - b_0 - \sum_{i=1}^p b_i x_i(k) \right]^2 \quad (7)$$

Esta minimización de la función se realizó mediante el algoritmo de optimización de Levenberg-Marquart, que es una combinación del método de Región de Confianza (TR) y el método de Gauss Newton, ya que este método permite minimizar

la función considerando restricciones en forma de caja. En este método cada iteración tiene la forma (Senocak, 2021):

$$(J^T(x_k)J(x_k) + \mu_k I)s_k = -J^T(x_k)r(x_k) \quad (8)$$

Donde  $\mu_k$  es un escalar escogido mediante alguna estrategia, típicamente se escoge a partir del método de región de confianza,  $J(x_k)$  es la matriz jacobiana de la función a minimizar,  $s_k$  corresponde al paso de Newton y  $r(x_k)$  es el residual de la función. La solución del problema por mínimos cuadrados lineales esta dado por:

$$\begin{bmatrix} J(x_k) \\ \sqrt{\mu_k I} \end{bmatrix} s_k \cong \begin{bmatrix} -r(x_k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Las restricciones utilizadas en la solución del sistema por este método fueron las restricciones para los Coeficientes de Regresión Lineal (OCR) dadas por  $b_i \in [0, \infty]$ .

Una vez obtenidos los OCR se determinaron las medidas de sensibilidad e incertidumbre dadas por:

Coeficiente de Determinación  $R_y^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_y^2} \quad (10)$

Coeficiente de Regresión Normalizado (NRC)  $NRC(y, x_i) = b_i \frac{x_i}{y} \quad (11)$

Coeficiente de Regresión Estandarizado (SRC)  $SRC_i = NRC_i \frac{CV_i}{CV_y} \quad (12)$

Coeficiente Lineal de Correlación (LCC)  $r_{yx_i} = \frac{\text{cov}(y, x_i)}{\text{var}(y) \text{var}(x_i)} \quad (13)$

Coeficiente Parcial de Correlación (PCC)  $PCC_i = \frac{-c_{iy}}{(c_{ii}c_{yy})^{1/2}} \quad (14)$

Coeficiente Semi-parcial de correlación (SPC)  $SPC_i = r_{y\bar{x}_i} \quad (15)$

$$\begin{array}{l} \text{Mínimos Cuadrados} \\ \text{Parciales Relativos (RPSS)} \end{array} \quad RPSS_i = \frac{S_y^2 - S_{y|i}^2}{S_y^2} \quad (16)$$

$$R^2 \text{ ajustada} \quad R_{adj}^2 = 1 - [1 - R^2] \left[ \frac{(N-1)}{N - (1+p)} \right] \quad (17)$$

$$\begin{array}{l} \text{Factor de} \\ \text{Variación de} \\ \text{Inflación (VIF)} \end{array} \quad VIF_i = [C_x]_{ii} = (1 - r_i^2)^{-1} \quad (18)$$

donde  $S_e^2$  es la variancia del error residual,  $S_y^2$  es la variancia de la simulación original del modelo y  $S_{y|i}^2$  es la variancia de los valores predichos  $\hat{y}(k)$  de la regresión del modelo,  $\bar{x}_i$  y  $\bar{y}$  son la media de los valores,  $CV_x$  y  $CV_y$  son los coeficientes de variación para  $x_i$  y  $y$ , respectivamente,  $cov(y, x_i)$  es la covariancia de  $y$  y  $x_i$ ,  $var(y)$  es la variancia de  $y$  y  $var(x_i)$  es la variancia de  $x_i$ ,  $c_{iy}$ ,  $c_{ii}$ ,  $c_{yy}$  son los elementos de la matriz inversa de correlación entre  $x$  y  $y$  basados en las  $N$  simulaciones,  $S_{y|i}^2$  es la variancia asociada al predictor lineal y en base a  $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_p$ ,  $r_{y\tilde{x}_i}$  denota el coeficiente de correlación semi-parcial entre  $y$  y  $\tilde{x}_i$ , resultante de corregir  $x_i$  por efectos de linealidad de las otras variables usando regresión simple,  $R^2$  es el coeficiente de determinación,  $N$  representa el número de simulaciones y  $p$  el número de parámetros,  $[C_x]_{ii}$  corresponde al  $i$ -ésimo elemento de la diagonal de la matriz inversa de correlación de  $x_i$ , la cual también se puede determinar mediante  $(1 - r_i^2)^{-1}$ , donde  $r_i^2$  es el coeficiente de correlación entre  $x_i$ .

El algoritmo para el análisis de sensibilidad utilizado en este estudio se muestra en la **Fig. 4** propuesto por Manache y Melching (2008).

## Resultados

Los resultados de las pruebas colorimétricas promediadas de las cuatro sesiones se muestran en la **Tabla 2**, en donde se observa que, en general las pruebas son congruentes con los valores de los SST, ya que, a mayor concentración de SST de la muestra, mayor es la absorción por parte de ésta, sin embargo, las muestras M6, M8 y M17 se descartaron por no seguir este comportamiento.

Con las muestras descartadas, se realizó el

análisis de función de mejor ajuste en donde se probaron 17 funciones de distribución continuas, entre ellas la distribución normal, log-normal, exponencial, gamma, beta, uniforme, nakagami, gumbell, Weibull, Pareto, Gauss inversa, logística, log-logística, Birman-Sanders, Rayleigh, Rician, entre otras. Las distribuciones con mejores ajustes se muestran en la **Fig. 5**, donde se muestran que fueron de probabilidad Weibull, gamma, normal, log-normal y exponencial; también se muestran las gráficas de los cuartiles Q-Q, las gráficas P-P y la función acumulada de las mismas distribuciones.

Para la selección de la distribución de probabilidad de mejor ajuste se realizaron las pruebas de Smirnov-Kolgomorov, Cramer-von Mises y Anderson-Darling, sin embargo, estas pruebas no fueron conclusivas por lo que se utilizó la información de AIC y BIC, donde la función de mejor ajuste seleccionado por estos valores fue la distribución Weibull, como se muestra en la **Tabla 3**.

Los datos estadísticos de las muestras se presentan en la **Tabla 4** y se utilizó la distribución Weibull truncada de  $[0, 100]$ , con 10,000 muestras aleatorias en ese intervalo para la realización de SMC.

Las muestras se ajustaron al modelo de absorción propuesto por una función polinomial de grado 2, ya que este modelo resultó tener el mejor ajuste estadístico a partir de la Ec. 2, en la **Figura 6** se muestran los modelos de ajuste para la absorbancia y la concentración de SST.

De los valores experimentales se obtuvieron las medidas de sensibilidad a partir del NRC, SRC, PCC, LCC, y RPSS del modelo lineal a partir del parámetro de entrada como se muestran en la **Tabla 5** y los datos de sensibilidad se muestran en la **Tabla 6**.

El resumen de la información del modelo de regresión lineal de salida se muestra en la **Tabla 7**.

## Discusión

Los modelos de correlación y regresión lineal se utilizaron como medidas de sensibilidad y confiabilidad para la determinación de pruebas experimentales colorimétricas y mediante la MCS. Los datos originales como los datos simulados se

**Tabla 2.** Concentrado de pruebas colorimétricas.

Muestra	Azul	Naranja	Rojo	Verde	Promedio	SST (mg/L)
M1	58.0045	59.8147	69.2013	63.6464	62.6667	5000.0000
M2	78.5353	78.2906	80.5859	80.6613	79.5183	2511.5000
M3	86.8576	89.7774	90.6198	90.1058	89.3402	1010.0000
M4	86.7875	93.0794	92.9817	90.8975	90.9365	517.5000
M5	81.9925	93.1416	94.0256	92.9551	90.5287	405.5500
M6	81.9925	84.8575	90.4670	91.7754	87.2731	379.0000
M7	90.2194	93.7085	94.1052	92.3496	92.5957	277.5000
M8	96.4232	97.9669	98.5731	97.0019	97.4913	180.0000
M9	95.7489	98.0626	98.0599	97.5539	97.3563	118.7500
M10	96.4204	99.2006	98.4196	97.1390	97.7949	85.0000
M11	99.9636	99.7434	97.5581	99.9986	99.3159	200.0000
M12	99.9648	98.5323	96.0701	98.9342	98.3753	160.0000
M13	99.9634	98.8903	99.9408	99.9979	99.6981	180.0000
M14	99.9644	99.9841	98.8351	99.9998	99.6958	102.4000
M15	99.9643	98.6134	97.8526	99.9992	99.1074	81.9200
M16	99.9609	99.9399	99.6854	99.9999	99.8965	65.5360
M17	92.7294	93.5444	91.6037	94.9325	93.2025	52.4300
M18	99.9622	99.7298	99.9299	100.0000	99.9055	41.9200
M19	99.9617	99.9833	99.9274	100.0008	99.9683	33.5500
M20	99.9602	99.5758	99.9274	99.9999	99.8658	26.8400
AG. DEST	99.9810	100.0047	99.9633	100.0196	99.9921	0.0000

**Tabla 3.** Pruebas de bondad de ajuste.

Test/Distribución	Normal	Log-Normal	Weibull	Exponencial	Gamma
Kolmogorov-Smirnov	0.3025	0.1289	0.1135	0.3042	0.1302
Cramer-von	0.3998	0.0511	0.0354	0.5481	0.0451
Anderson-Darling	2.2426	0.3191	0.2304	4.8315	0.2793
Criterio de Información Akaike>s	135.3424	89.7196	88.8119	101.7278	89.2255
Criterio de Información Bayesian	137.1232	91.5004	90.5927	102.6182	91.0062

**Tabla 4.** Datos estadísticos de los valores experimentales.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Media	Desv. estándar	Distribución
Absorción	0.00213	37.3332	5.7464	9.6258	Weibull

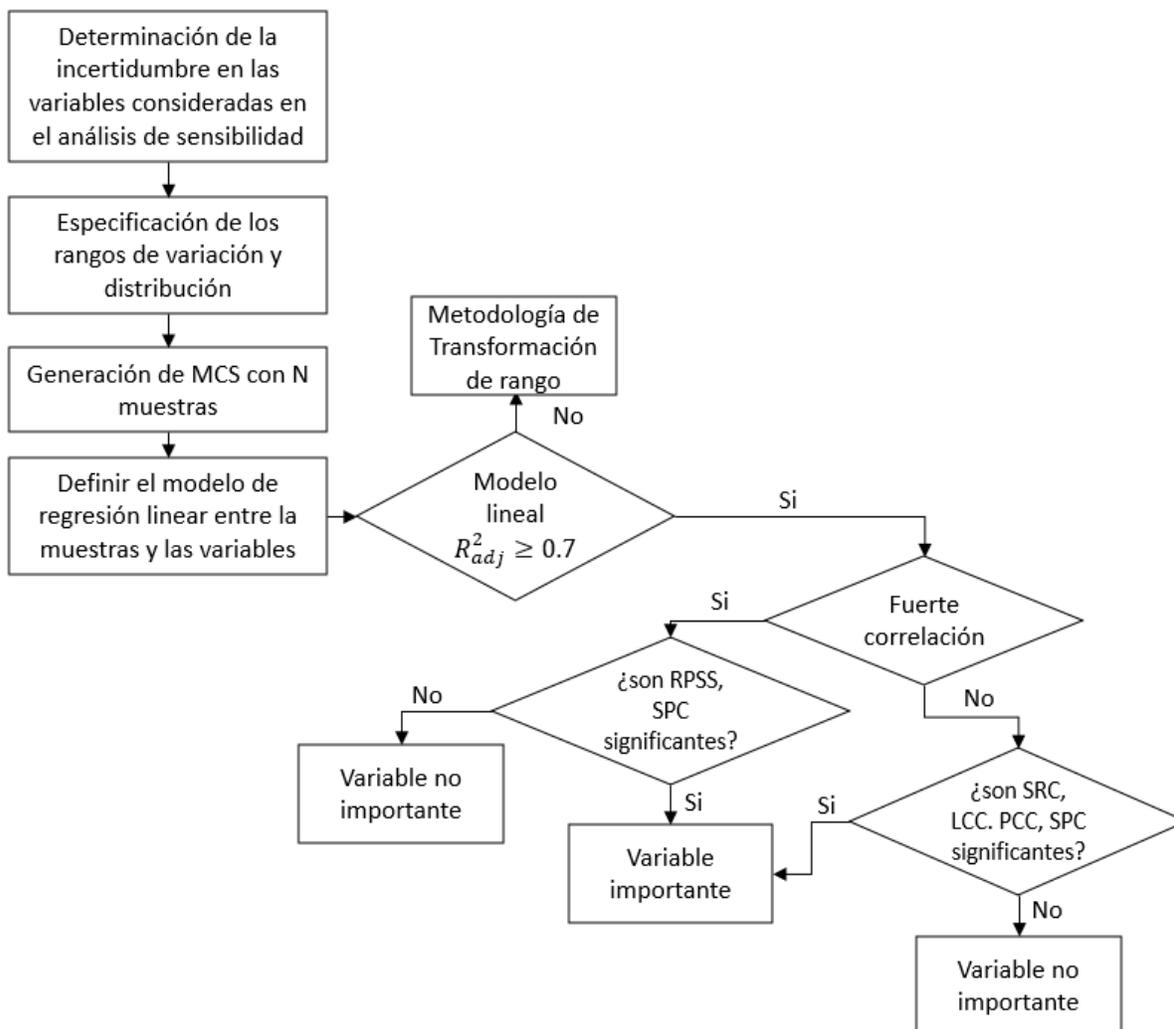


Figura 4. Esquema del análisis de sensibilidad aplicado a este trabajo.

Tabla 5. Valores de sensibilidad del modelo con valores experimentales.

	NRC	SRC	PCC	SPC	LCC	RPSS
Absorbancia	1.2041	0.9712	1	1	0.9712	0.999

Tabla 6. Valores de sensibilidad para N simulaciones con MCS.

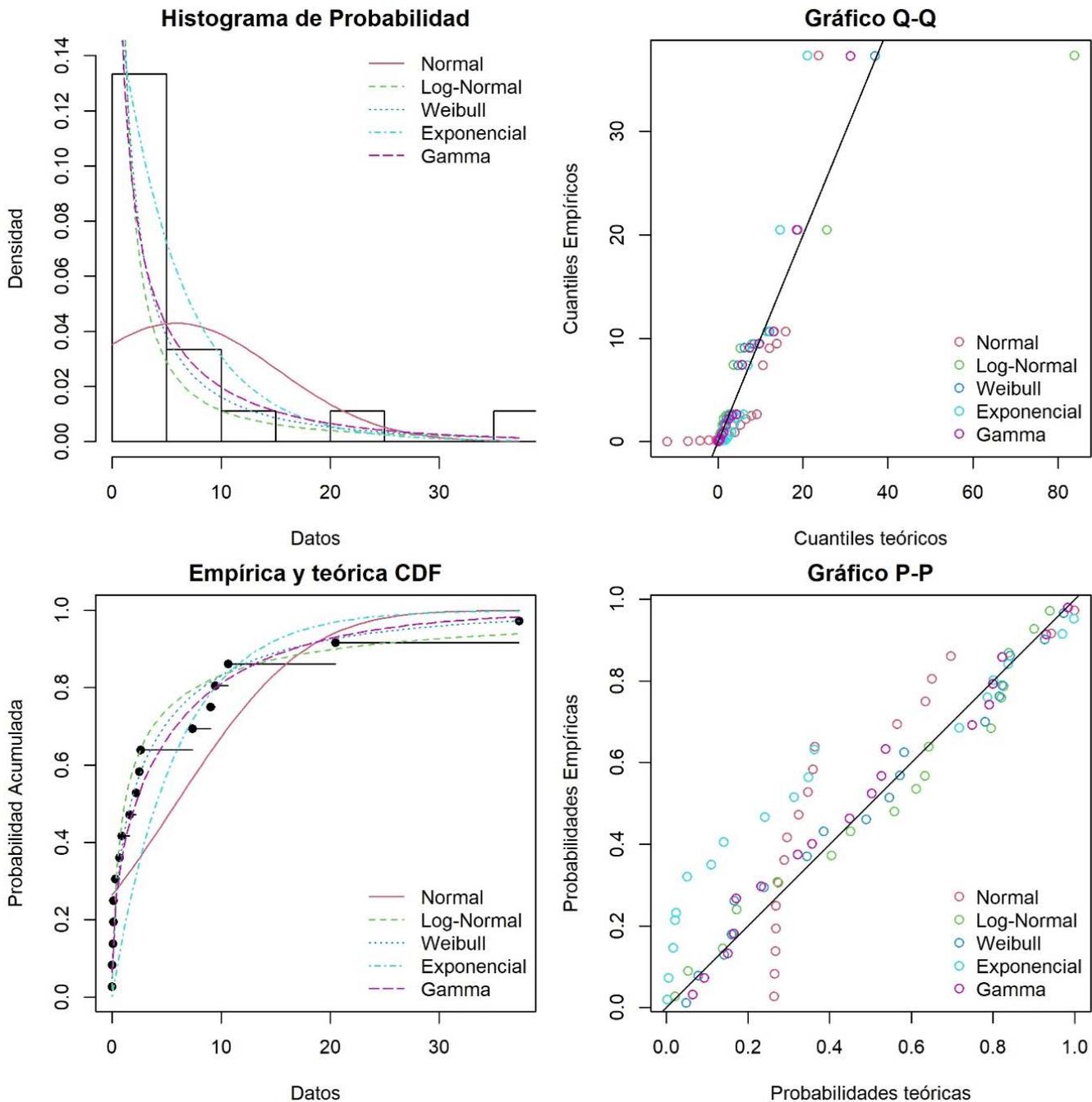
	NRC	SRC	PCC	SPC	LCC	RPSS
Absorbancia	1.4609	0.9450	1	1	0.9450	1

Tabla 7. Valores de regresión lineal a partir de los datos originales y simulados.

Estadístico de regresión	Datos originales	Datos simulados
VIF	34.7222	18.1818
R <sup>2</sup>	0.943	0.893
R <sup>2</sup> ajustada	0.94	0.893
F regresión	267	83416
Error Estándar de regresión-estimado	7.7122	0.60172

calcularon a partir del cumplimiento del algoritmo mostrado en la Fig. 4, ya que para poder utilizar un modelo de regresión y correlación lineal se debería cumplir un ajuste de regresión lineal con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> ajustada de al

menos 0.7. En los dos casos, los datos originales y MCS, se cumplió el supuesto, ya que los R<sup>2</sup> ajustados fueron de 0.94 y 0.89, respectivamente, por lo que el algoritmo se pudo llevar a cabo. De

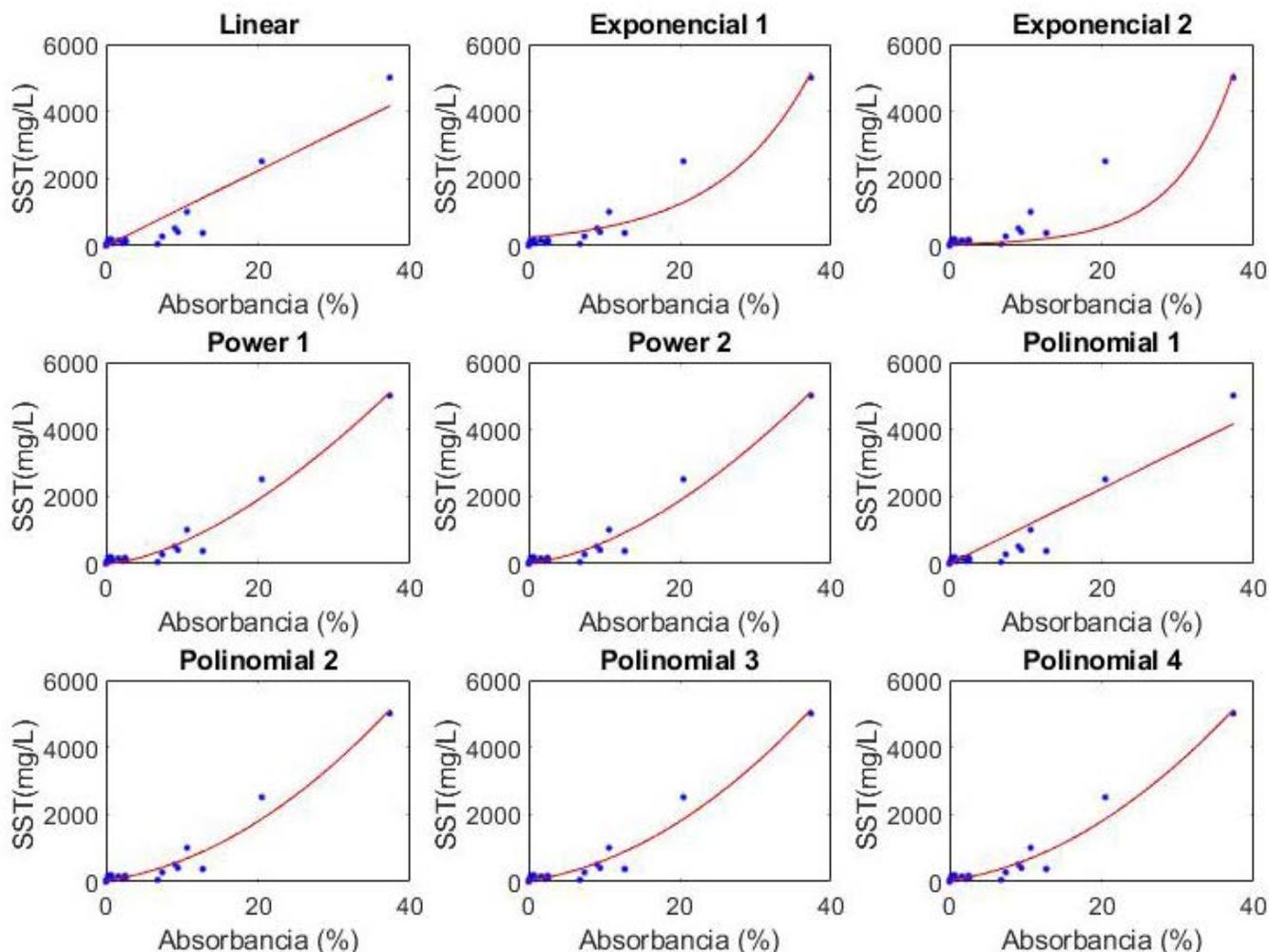


**Figura 5.** Función de probabilidad de mejor ajuste para pruebas colorimétricas.

acuerdo a estudios previos, en caso de no lograr el ajuste mínimo requerido en la regresión lineal, aún es posible utilizar el algoritmo propuesto, siempre y cuando el modelo a probar corresponda a una función monótona y mediante el método de transformación de rango (Iman y Conover, 1979). Para el caso de funciones no lineales o no monótonas es necesario el uso de otro algoritmo diferente como puede ser el

caso de metodologías basadas en rejillas y entropía (Iman y Helton, 1988).

En este trabajo las medidas más relevantes para la determinación de la sensibilidad del modelo se describen por medio del método de los Mínimos Cuadrados Parciales Relativos (RPSS) que para la simulación de Monte Carlo resultó de 1.0 y para los datos originales de 0.999; éste valor resultó



**Figura 6.** Modelos de mejor ajuste para las muestras colorimétricas

muy significativo, al igual que el Coeficiente Semiparcial de Correlación (SPC) siendo éste de 1.0 en los dos casos, por lo que la variable de absorción para la determinación de SST se convierte en una variable de suma importancia para la determinación de este parámetro. Cabe mencionar que este estudio se puede extrapolar a modelos que contengan más de un parámetro e incluso puede adoptarse a modelos dinámicos o softwares computacionales de calidad del agua, destacándose que para poder considerar la absorción como una variable con una fuerte correlación se consideró el valor de 0.8 en el algoritmo, mismo que se programó en el software Matlab, así como la simulación de Monte Carlo y la determinación de los valores de correlación y regresión.

### Conclusiones

En este trabajo se determinó la variable de absorbancia como importante dado los resultados obtenidos del RPSS y SPC. La determinación de la importancia de la variable se realizó de acuerdo al algoritmo propuesto en el trabajo “Identification of reliable regression- and correlation-based sensitivity measures for importance ranking of water-quality model parameters”, mismo que emplea los coeficientes de correlación y regresión como medidas de sensibilidad e incertidumbre.

Aunque este estudio se centró en el efecto de la absorbancia como parámetro de incertidumbre en la predicción del modelo, el enfoque desarrollado puede aplicarse a cualquier otro factor incierto utilizado en las simulaciones del modelo, por ejemplo, datos de entrada, condiciones de contorno,

entre otras y puede aplicarse a una amplia variedad de problemas. Las medidas propuestas en este trabajo son apropiadas para modelos que son aproximadamente lineales o monótonamente no lineales por medio del método de transformación de rango.

Dado que en los resultados se obtuvieron buenos indicadores de sensibilidad del RPSS y SPC, se concluye que las técnicas colorimétricas permiten una adecuada predicción de la concentración de SS mediante el análisis de la absorbancia, esto se refleja a partir de los valores de regresión obtenidos, sin embargo, es importante mencionar que el modelo realizado se puede lograr calibrar con más datos generados de forma experimental para poder mejorar el modelo propuesto, así como la simulación de Monte Carlo.

## Referencias

- Herrera JLN (2017). Diseño y construcción de un Equipo de Medición para el Estudio de la Transmitancia y el Esparcimiento de Luz (EMETEL) en una suspensión. MCs thesis Universidad Politécnica Nacional p 82.
- Iman RL, Helton JC (1988). An investigation of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models. *Risk Analysis* 8(1):71-90. doi:10.1111/j.1539-6924.1988.tb01155.
- Iman RL, Helton JC (1985). A comparison of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models. Report. NUREGICR-3904, SAND 84-1461. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- Iman RL, Conover WJ (1979). The use of the rank transform in regression. *Technometrics* 21(4):499-509. doi:10.1080/00401706.1979.10489820.
- Manache G, Melching CS (2008). Identification of reliable regression- and correlation-based sensitivity measures for importance ranking of water-quality model parameters. *Environmental Modelling and Software* 23(5):549-562. doi:10.1016/j.envsoft.2007.08.001.
- van Loosdrecht MCM, Nielsen PH, López-Vázquez CM, Brdjanovic D, Gutiérrez CM, Fall C (2019). Métodos experimentales para el tratamiento de aguas residuales. IWA Publishing. doi:10.2166/9781780409252.
- Montgomery DC, Runger GC (2018). Applied statistics and probability for engineers, Seventh Edition, Wiley Ed., p. 710.
- Pappenberger F, Iorgulescu I, Beven KJ (2006). Sensitivity analysis based on regional splits and regression trees (SARS-RT). *Environmental Modelling & Software* 21(7):976-990. doi:10.1016/j.envsoft.2005.04.010.
- Saltelli A, Ratto M (2008). Global sensitivity analysis. In John Wiley & Sons Ltd, (Vol. 1, Issue 5). doi:10.1002/9780470725184.
- Saltelli A (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis* 22(3):579-590. doi:10.1111/0272-4332.00040.
- Saltelli A, Andres TH, Homma T (1993). Sensitivity analysis of model output: an investigation of new techniques. *Computational Statistics and Data Analysis* 15:211-238. doi:10.1016/0167-9473(93)90193-W.
- Saltelli A, Homma T (1992). Sensitivity analysis for model output. Performance of black box techniques on three international benchmark exercises. *Computational Statistics and Data Analysis* 13(1):73-94. doi:10.1016/0167-9473(92)90155-9.
- Saltelli A, Marivoet J (1990). Nonparametric statistics in sensitivity analysis for model output: a comparison of selected techniques. *Reliability Engineering and System Safety* 28:229-253. doi:10.1016/0951-8320(90)90065-U.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. (Vol. 5, pp. 1-17).
- Senocak I (2020). Scientific Computing. An Introductory Survey. Revised Second Edition. *AIAA Journal* 59(1):417-418. doi:10.2514/1.J060261.
- Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD (2002). Wastewater engineering\_ treatment and reuse McGraw-Hill (p. 1846).



# Determinación de sólidos suspendidos como parámetros de calidad del agua a partir de técnicas de impacto acústico y su efectividad

## Determination of suspended solids as water quality parameters using acoustic impact techniques and their effectiveness

Itzel Luviano Soto<sup>1\*</sup>, Yajaira Concha Sánchez<sup>1</sup>, Bertha Alejandra Olmos Navarrete<sup>1</sup>, Gabriel Arroyo Correa<sup>2</sup>, José Vega Cabrera<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Mújica, Col. Felicitas del Río C.P. 58040, Morelia, Michoacán.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Mújica, Col. Felicitas del Río C.P. 58040, Morelia, Michoacán.

### Historial

Manuscrito recibido: 1 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Itzel Luviano Soto

e-mail: itzel.luviano@umich.mx

### Resumen

Uno de los parámetros más importantes en la caracterización del agua residual son los Sólidos Suspendidos (SS), es por ello que el presente trabajo tiene como finalidad la determinación de sólidos a partir de técnicas alternativas, como es el impacto acústico, para determinar la frecuencia de resonancia dominante en el espectro de Fourier de la muestra de agua correspondiente. La respuesta acústica fue medida usando una interfaz PASCO750 y a una razón de muestreo de 20 kHz. Posteriormente, se aproximó el comportamiento de las ondas acústicas con un modelo de ajuste y se asoció a una función de probabilidad condicionada, la cual se validó a partir de simulaciones mediante el método de Monte Carlo para predecir la confiabilidad de la técnica de aproximación.

**Palabras clave:** impacto acústico, espectro de Fourier, calidad del agua, confiabilidad

### Introducción

El agua es la sustancia más importante para la supervivencia de los seres vivos, ésta se utiliza para el desarrollo de actividades domésticas, industriales, comerciales, agrícolas y pecuarias, entre otras, y si bien esta sustancia es indispensable para la vida humana, durante los últimos años, se han notado las repercusiones de la contaminación de este recurso.

Hoy en día la evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo con base en la normativa vigente; para las aguas residuales la norma denominada

### Abstract

One of the most important parameters in the characterization of residual water is the Suspended Solids (SS), for this reason, the purpose of this work is the determination of solids from alternative techniques, such as acoustic impact, to determine the frequency of dominant resonance in the Fourier spectrum of the corresponding water sample. The acoustic response was measured using a PASCO750 interface and at a sampling rate of 20 kHz. Subsequently, the behavior of the water waves was approximated with an adjustment model and associated with a conditional probability function, which was validated from simulations using the Monte Carlo method to predict the reliability of the approximation technique.

**Keywords:** acoustic impact, Fourier spectrum, water quality, reliability.

NOM-001-SEMARNAT-2021 que marca los límites máximos permisibles de contaminantes que pueden descargarse al ambiente (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022) y para la regulación del agua potable la norma denominada NOM-127-SSA-2021 (Secretaría de Salud, 2022). En estas normas se encuentran definidos los parámetros máximos permisibles de calidad del agua como la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días ( $DBO_5$ ), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendidos Totales (SST),

solidos sedimentables, coliformes fecales, grasas y aceites, metales pesados, entre otros.

Actualmente, pese a que se ha realizado un gran esfuerzo por el monitoreo de la calidad del agua residual, resulta un reto efectuarlo constantemente ya que dado el tipo de parámetros de contaminación es necesario el uso de un laboratorio químico-biológico de calidad del agua, el cual utiliza varios reactivos, equipo especializado y personal capacitado. Lo anterior implica costos elevados en la evaluación de la calidad del agua. Es por ello, que en este trabajo se presenta una técnica alternativa para poder determinar la concentración de SST del agua a partir de técnicas acústicas, ya que éste es uno de los parámetros más importantes en la correcta caracterización de aguas residuales (Tchobanoglous *et al.*, 2002).

Las técnicas acústicas se basan en la propagación de ondas sonoras y de la frecuencia de las señales emitidas y detectadas. En la mayoría de los métodos acústicos se mide el tiempo de propagación de impulsos, para algunos otros métodos la intensidad de la señal es la analizada (Maierhofer *et al.*, 2010). Algunas de las técnicas más utilizadas en el área ingenieril son los métodos de pulso ultrasónico, técnicas de eco-impacto (impacto acústico), emisión acústica, velocidad de pulso entre otras. Las ondas sónicas están directamente relacionadas con el comportamiento mecánico de los materiales, por ello los métodos acústicos son muy utilizados como técnicas no destructivas.

Existen diferentes métodos acústicos; sin embargo, muchos de estos resultan ser costosos, por lo que en este trabajo se propone el uso del Impacto Acústico (IA), que ha sido una buena técnica para la caracterización de materiales (Maierhofer *et al.*, 2010). Dado que la técnica de IA es nueva en la caracterización de la calidad del agua, puede ser incierta, por lo que un análisis de su efectividad resulta esencial. Actualmente, existen diferentes estrategias para realizar un análisis de confiabilidad, como el análisis diferencial (sensibilidad local), análisis de Monte Carlo (sensibilidad global), Test de Amplitud de Sensibilidad de Fourier, FAST (sensibilidad global) y una metodología de superficie de respuesta (sensibilidad global)

(Saltelli *et al.*, 2007).

Se han reportado varios métodos de sensibilidad (e.g. Iman y Helton, 1985, 1988; Saltelli y Marivoet, 1990; Saltelli y Homma, 1992; Saltelli *et al.*, 1993 y Pappenberger *et al.*, 2006), en los cuales se demuestra qué, con la ayuda de elementos computacionales, el análisis de sensibilidad basados en múltiples simulaciones, tales como la Simulación de Monte Carlo (MCS) y Muestreo de Hipercubo Latino (LHS) son los más robustos, efectivos y flexibles comparados con otros métodos. Los métodos MCS y LHS implican un muestreo de un rango posible de las variables de entrada seguidas por el modelo de evaluaciones para los valores muestreados después de lo cual se utiliza la regresión y las medidas de sensibilidad basadas en la correlación que se pueden calcular (Manache y Melching, 2008).

El análisis de eficacia de este trabajo se basa en el análisis de sensibilidad basado en la MCS, está limitado a la influencia de la incertidumbre del resultado del modelo propuesto; sin embargo, esta incertidumbre y sensibilidad se pueden determinar mediante varias medidas de correlación y regresión en la determinación de SST como parámetros de calidad del agua.

## Materiales y métodos

Para la determinación de SST por IA, se diseñaron veinte muestras de agua con diversas concentraciones de SST en las cuales se mezcló agua destilada con sólidos de origen inorgánico. Para dichas muestras se trabajó con material arcilloso, constituido principalmente de silicato hidratado de alúmina. Este material fue granulométricamente seleccionado y tamizado por la malla granulométrica #200, obteniendo así material de 74 micrómetros, aproximadamente. Este material se pesó en una báscula analítica con precisión de 0.1 mg, de ésta se obtuvieron 20 medidas del material, y posteriormente se mezclaron con 200 mL de agua destilada para obtener muestras puras de agua con SST.

Una vez diseñadas las muestras con SST, éstas se depositaron en una celda cúbica de polipropileno de 5 cm x 5 cm x 5 cm de arista, con capacidad de 125 ml de agua, en donde se realizaron las

pruebas acústicas mediante un inductor de pulsos sonoros senoidales de 10,000 Hz con duración de 60 milisegundos (ms). La respuesta acústica fue medida usando una interfaz PASCO 750, conectada a dos sensores de sonido (Sensor A y Sensor B), marca PASCO CA-6506B, uno colocado en la dirección del impacto (Sensor A) y el otro colocado a 90° (Sensor B), como se muestra en la **Figura 1**, y usando una razón de muestreo de 20 kHz.

Una vez capturadas las señales en volts de cada uno de los sensores o canales (A y B), se obtuvo la Transformada Rápida de Fourier, FFT por sus siglas en inglés, la cual, se determina mediante la Ec. 1.

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i\omega n} \quad (1)$$

donde  $X(\omega)$  es una frecuencia periódica,  $\omega = 2\pi k/N$ , con valores de  $k = 0, 1, \dots, N-1$ ,  $x(n)$  es la respuesta acústica registrada en volts,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $e$  representa el número de Euler. Con la máxima amplitud se determina la frecuencia dominante en Hz, en cada una de las muestras de sólidos se obtuvo su amplitud y frecuencia dominante característica correspondiente a cada concentración de SST.

Con la información obtenida de las FFT, se realizó un modelo de ajuste en donde se probaron varios

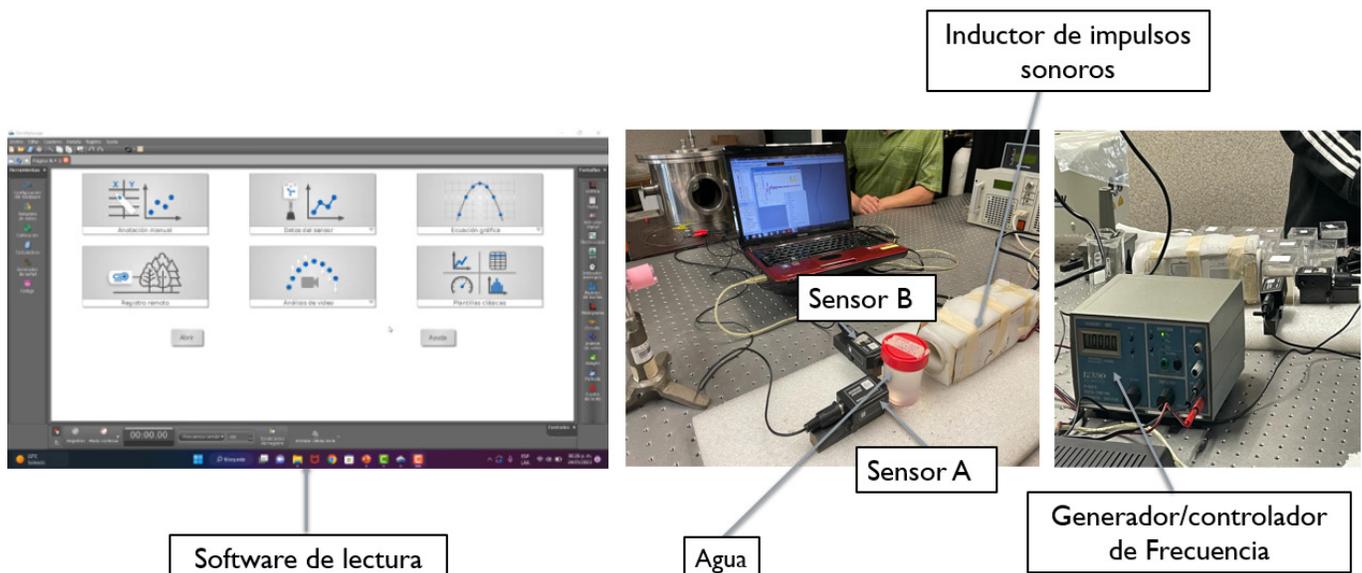
modelos, tales como funciones lineales, polinómicas de grado 1 hasta 8, funciones Gaussianas, funciones de Fourier, de potencia, entre otras. Este proceso se realizó mediante el algoritmo de Levenberg-Marquart (Ec. 2), que permite restricciones en forma de caja y esfera. Este proceso se realizó mediante la combinación de los métodos de Gauss-Newton y región de confianza, minimizando la función mediante mínimos cuadrados no lineales, en donde cada iteración tiene la forma (Senocak, 2021):

$$(J^T(x_k)J(x_k) + \mu_k I)s_k = -J^T(x_k)r(x_k) \quad (2)$$

donde  $\mu_k$  es un escalar escogido mediante alguna estrategia, típicamente se escoge a partir del método de región de confianza,  $J(x_k)$  es la matriz jacobiana de la función a minimizar,  $s_k$  corresponde al paso de Newton y  $r(x_k)$  es el residual de la función. La solución del problema por mínimos cuadrados lineales esta dado por:

$$\begin{bmatrix} J(x_k) \\ \sqrt{\mu_k} I \end{bmatrix} s_k \cong \begin{bmatrix} -r(x_k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Las restricciones utilizadas en la solución del sistema por este método fueron las restricciones



**Figura 1.** Arreglo acústico experimental.

para los Coeficientes de Regresión Lineal (OCR) dadas por  $b_i \in [0, \infty]$ , este proceso se realizó en el software Matlab. De igual forma, las frecuencias dominantes obtenidas se asociaron a una función de probabilidad, mediante el método de máxima verosimilitud (Montgomery y Runger, 2018) que consiste en que dada  $f_X(X, \theta)$  que denote la función de densidad de probabilidad conjunta de un vector de variables aleatorias  $X$  y  $\theta$  el conjunto de los parámetros de la distribución, en este método se intenta estimar  $\theta$ , maximizando la probabilidad de ocurrencia de los eventos  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , cuando esta probabilidad está escrita como función de  $\theta$ . Para este propósito se define  $L(\theta)$  como una función que es proporcional a la probabilidad  $P(E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n)$ . En el caso especial en que los eventos  $E_1, E_2, \dots, E_n$  sean un conjunto de observaciones estadísticamente independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$  de una variable continua  $X$ , la función de verosimilitud se describe con la ecuación 4 (Montgomery y Runger, 2018):

$$L(\theta) \approx \prod_{i=1}^n f_X(x_i, \theta) \tag{4}$$

dado que el parámetro  $\theta$  se obtiene mediante la maximización de la distribución, se utilizó el método Broyden-Fletcher-Golfarb-Shannon (BFGS) para la optimización del mismo, mediante la Ec. 5.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k B_k^{-1} \nabla f(x_k) \tag{5}$$

donde  $\alpha_k$  es un parámetro de búsqueda en línea,

$\nabla f(x_k)$  es el gradiente de la función  $f(x_k)$ ,  $B_k$  es una aproximación de la matriz Hessiana (derivada parcial de la matriz gradiente de la función global), la aproximación de esta matriz parte de la matriz identidad y a partir de un valor inicial se actualiza mediante el paso de Newton (Senocak, 2021), este algoritmo se muestra en la **Tabla 1**.

La función de probabilidad de mejor ajuste se determinó mediante las pruebas de bondad de ajuste de Kolgomorov-Smirnov, Cramer-von Mises y Anderson-Darling, y los Criterios de Información de Akaike (AIC) y Criterio de Información Bayesiano (BIC), los cuales son de los más utilizados (Flowers-Cano *et al.*, 2014), este proceso se realizó con el software de RStudio.

Una vez seleccionada la función de mejor ajuste, se realizó una Simulación de Monte Carlo (MCS) con 10,000 muestras aleatorias a partir de los parámetros obtenidos de las distribuciones, con estos valores se realizó el análisis de confiabilidad de esta técnica mediante medidas de correlación y regresión lineal.

Para determinar las variables de sensibilidad e incertidumbre fue necesario ajustar un modelo lineal de los valores de colorimetría donde  $y = y_1, y_2, \dots, y_n$ , corresponden a los valores de salida de MCS, y  $X(N \times p)$  la matriz que contiene los valores de los parámetros  $p$  de las variables de entrada del modelo para  $N$  simulaciones, en este caso el único parámetro determinado fue la absorbancia por lo que la matriz se convirtió en un vector:

**Tabla 1.** Algoritmo BFGS para optimización.

$x_0 = \text{valor inicial}$	
$B_0 = \text{aproximación inicial del Hessiano}$	
for $k = 0, 1, 2 \dots$	
Solve $B_k s_k = \nabla f(x_k)$ for $s_k$	{Paso de quasi-Newton}
$x_{k+1} = x_k + s_k$	{actualización de la solución}
$B_{k+1} = B_k + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k}$	{aproximación actualizada del Hessiano}
end	

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \dots \\ x_{N1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Mediante la regresión por mínimos cuadrados del modelo de salida en la  $k$ -ésima simulación ( $k = 1, \dots, N$ ) y con la asociación de la muestra de parámetros el modelo lineal puede ser descrito de la siguiente forma:

$$y(k) = b_0 + \sum_{i=1}^p b_i x_i(k) + e(k) = \hat{y}(k) + e(k) \quad (7)$$

donde  $y(k)$  y  $x_i$  son los valores de salida del modelo y los parámetros de entrada respectivamente en la  $k$ -ésima simulación,  $e(k)$  es la regresión residual,  $\hat{y}(k)$  es la regresión estimada en el modelo de salida y  $b_0, b_1, \dots, b_p$  son los Coeficientes de Regresión Lineal (ORC) obtenidos a partir de la minimización de la función de mínimos cuadrados  $F(b)$ .

$$F(b) = \sum_{k=1}^N \left[ y(k) - b_0 - \sum_{i=1}^p b_i x_i(k) \right]^2 \quad (8)$$

Una vez obtenidos los ORC se determinaron las medidas de sensibilidad e incertidumbre dadas por:

Coeficiente de Determinación  $R_y^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_y^2} \quad (9)$

Coeficiente de Regresión Normalizado (NRC)  $NRC(y, x_i) = b_i \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}} \quad (10)$

Coeficiente de Regresión Estandarizado (SRC)  $SRC_i = NRC_i \frac{CV_i}{CV_y} \quad (11)$

Coeficiente Lineal de Correlación (LCC)  $r_{yx_i} = \frac{\text{cov}(y, x_i)}{\sqrt{\text{var}(y) \text{var}(x_i)}} \quad (12)$

Coeficiente Parcial de Correlación (PCC)  $PCC_i = \frac{-c_{iy}}{(c_{ii}c_{yy})^{1/2}} \quad (13)$

Coeficiente Semi-parcial de correlación (SPC)  $SPC_i = r_{y\bar{x}_i} \quad (14)$

Mínimos Cuadrados Parciales Relativos (RPSS)  $RPSS_i = \frac{S_y^2 - S_{y|i}^2}{S_y^2} \quad (15)$

R<sup>2</sup> ajustada  $R_{adj}^2 = 1 - [1 - R^2] \left[ \frac{(N-1)}{N - (1+p)} \right] \quad (16)$

Factor de Variación de Inflación (VIF)  $VIF_i = [C_x]_{ii} = (1 - r_i^2)^{-1} \quad (17)$

donde  $S_e^2$  es la variancia del error residual,  $S_y^2$  es la variancia de la simulación original del modelo y  $S_{\hat{y}}^2$  es la variancia de los valores predichos  $\hat{y}(k)$  de la regresión del modelo,  $\bar{x}_i$  y  $\bar{y}$  son la media de los valores,  $CV_i$  y  $CV_y$  son los coeficientes de variación para  $x_i$  y  $y$ , respectivamente,  $\text{cov}(y, x_i)$  es la covariancia de  $y$  y  $x_i$ ,  $\text{var}(y)$  es la variancia de  $y$  y  $\text{var}(x_i)$  es la variancia de  $x_i$ ,  $c_{iy}$ ,  $c_{ii}$ ,  $c_{yy}$  son los elementos de la matriz inversa de correlación entre  $x$  y  $y$  basados en las  $N$  simulaciones,  $S_{y|i}^2$  es la variancia asociada al predictor lineal y en base a  $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_p$ ,  $r_{y\bar{x}_i}$  denota el coeficiente de correlación semi-parcial entre  $y$  y  $\bar{x}_i$ , resultante de corregir  $x_i$  por efectos de linealidad de las otras variables usando regresión simple,  $R^2$  es el coeficiente de determinación,  $N$  representa el número de simulaciones y  $p$  el número de parámetros,  $[C_x]_{ii}$  corresponde al  $i$ -ésimo elemento de la diagonal de la matriz inversa de correlación de  $x_i$ , la cual también se puede determinar mediante  $(1 - r_i^2)^{-1}$ , donde  $r_i^2$  es el coeficiente de correlación entre  $x_i$ .

Cabe mencionar que esta metodología solo es aplicable para funciones lineales o monóticamente lineales; en caso de que el ajuste lineal descrito con la Ec. 7, no logre un  $R_{adj}^2$  igual o mayor a 0.70, valor propuesto por Gemma Manache (Manache y Melching, 2008), en ese caso es necesario realizar una transformación de datos por rango (Iman y Conover, 1979), para lograr mejorar el ajuste, esto

se logra rankeando los valores de las variables  $y$  y de las variables  $x_i$ , como se muestra en la siguiente ecuación (Iman y Conover, 1979).

$$R_y(k) = b_0 + \sum_{i=1}^p b_i R_{x_i}(k) + e(k) = \widehat{R}_y(k) + e(k) \quad (18)$$

donde  $R_y(k)$  y  $R_{x_i}(k)$  son los valores rankeados del modelo de salida y los parámetros en el  $k$ -ésimo valor del modelo,  $e(k)$  corresponde al residual de la regresión en la transformación por rango y  $\widehat{R}_y(k)$  es la regresión estimada del modelo rankeado, con esta nueva regresión es posible obtener los valores de los Coeficientes de Regresión Normalizados en Rango (NRRC), Coeficiente de Regresión Estandarizado en Rango (SRRC), Coeficiente Lineal de Correlación en Rango (LRCC), el Coeficiente Parcial de Correlación en Rango (PRCC), Coeficiente Semi-

Parcial de Correlación en Rango (SRPC) y los Mínimos Cuadrados Parciales Relativos en Rango (RPSS), utilizando sus respectivas Ecs., pero empleando la regresión lineal con la transformación de rangos. Para el caso de funciones no lineales o no monolíticas es necesario el uso de otro algoritmo diferente como puede ser el caso de metodologías basadas en rejillas y entropía (Iman y Helton, 1988).

Con estos valores se determinó la sensibilidad del modelo utilizando el algoritmo de análisis propuesto por Gemma Manache (Manache y Melching, 2008), descrito en la **Figura 2**.

### Resultados

Los resultados de las pruebas acústicas de las cuatro sesiones de análisis se promediaron para obtener los voltajes de cada una de las correspondientes muestras analizadas, con esta información se determinó es espectro de Fourier a partir de la Ec.

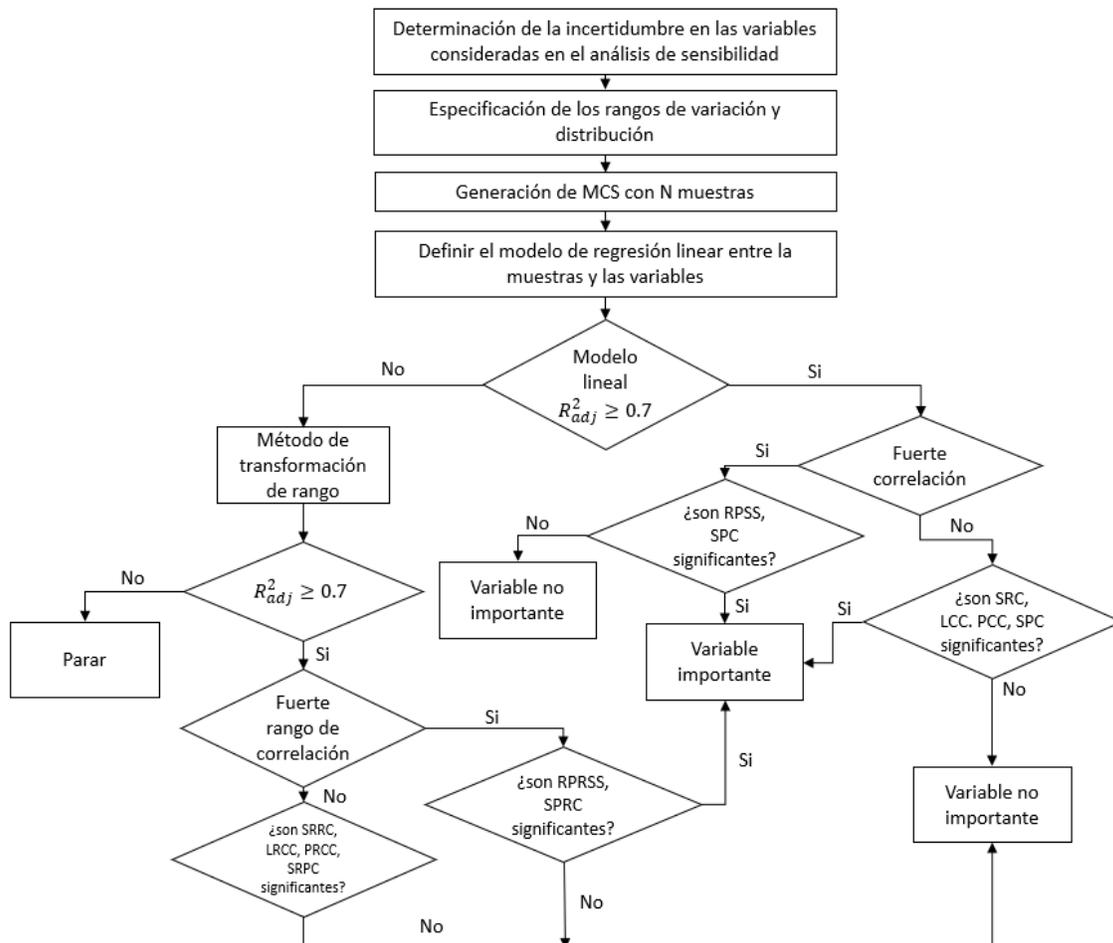


Figura 2. Algoritmo de sensibilidad para pruebas acústicas.

1, este proceso se realizó en el software de Matlab y los resultados de los espectros en conjunto con sus frecuencias dominantes y amplitudes se muestran en la **Figura 3**.

Las frecuencias dominantes con sus respectivas amplitudes se muestran en la **Tabla 2**.

Con la información de la **Tabla 2**, mediante el método de Levenberg-Marquart con restricciones en los coeficientes de los ajustes se obtuvieron los modelos mostrados en la **Figura 4**.

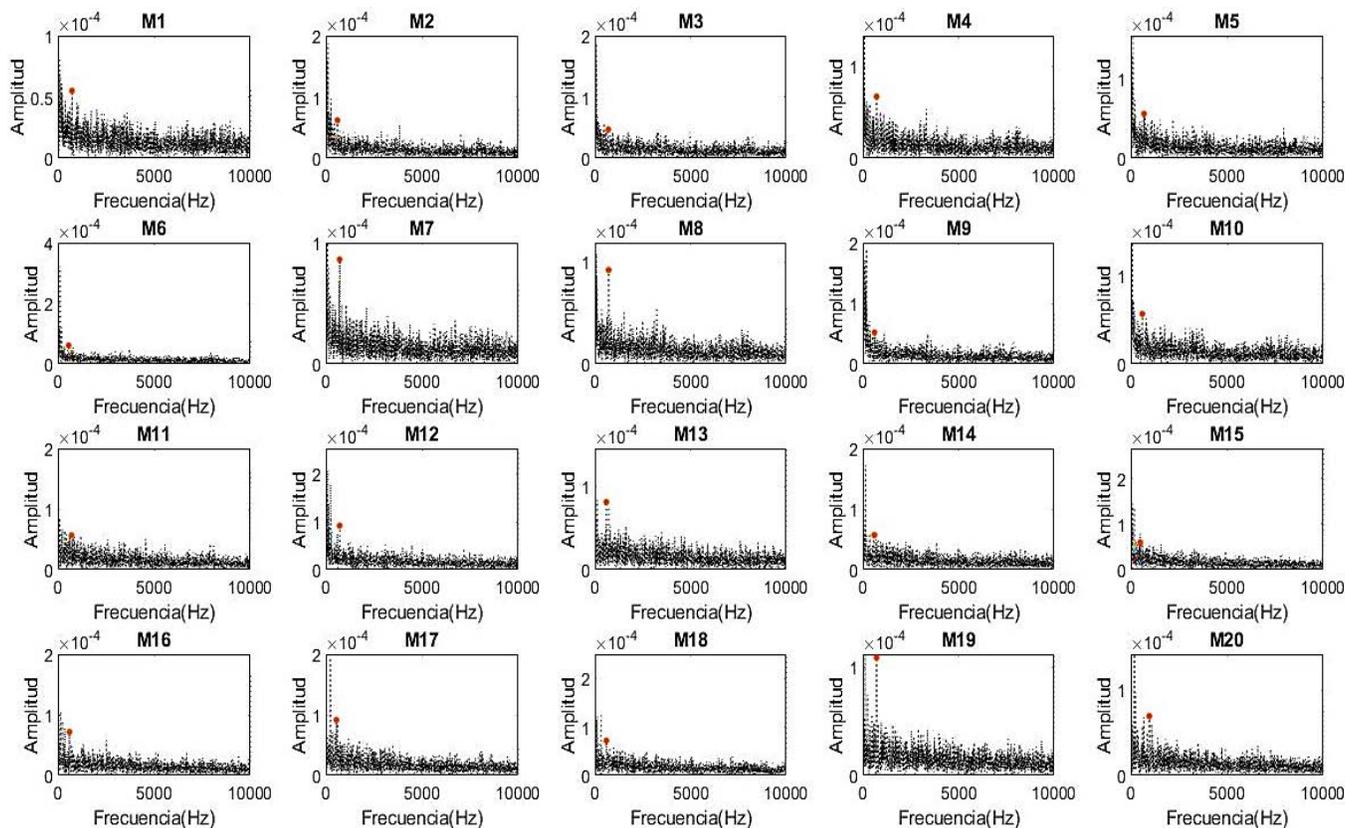
El modelo seleccionado para el mejor ajuste fue un polinomio de grado 3 con la estructura descrita por la Ec. 19.

$$\hat{y} = 1.528 \times 10^{-8} x^3 + 9.051 \times 10^{-27} x^2 + 2.923 \times 10^{-19} x + 5.415 \times 10^{-12} \quad (19)$$

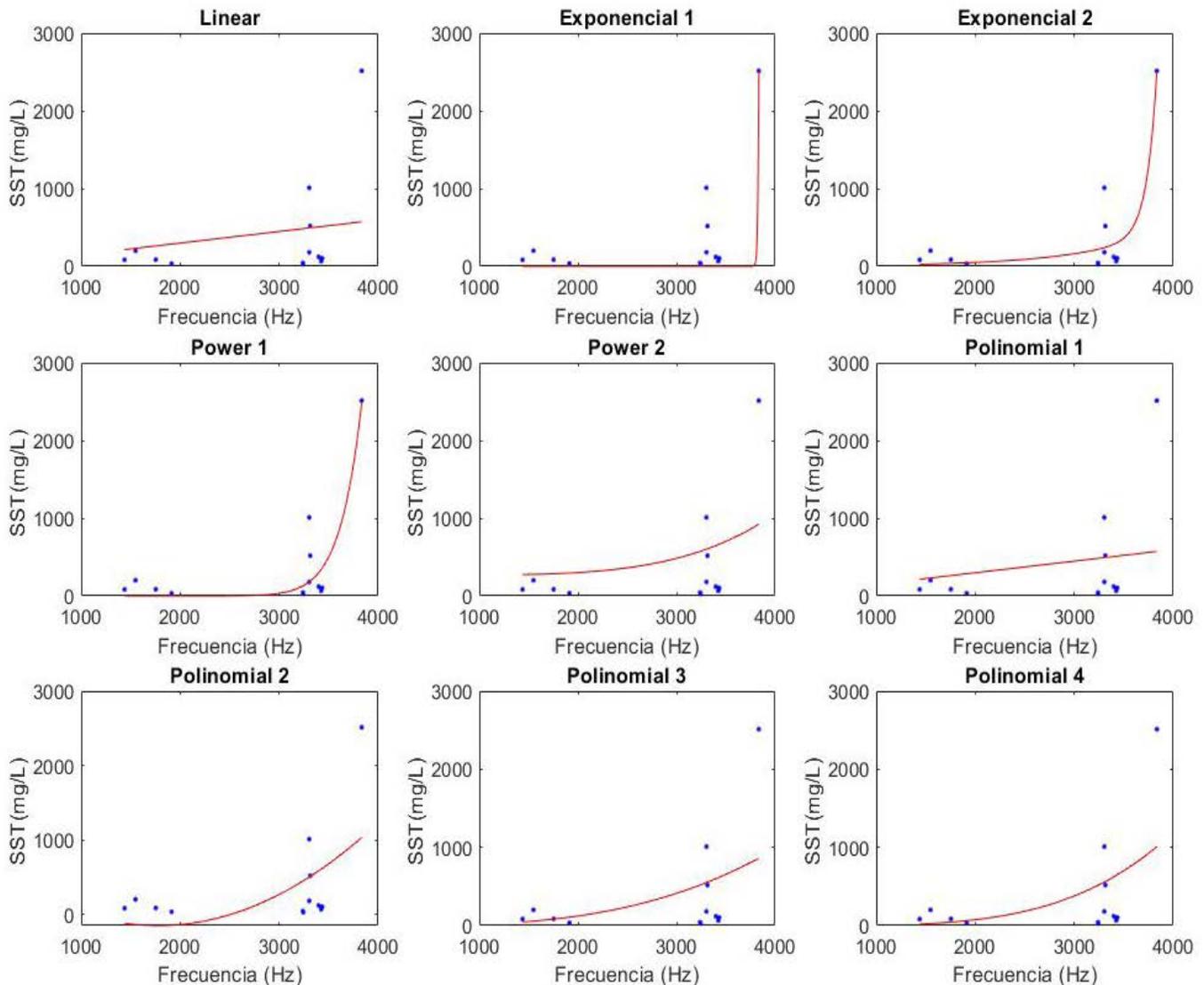
Para realizar la MCS se determinó la función de probabilidad de mejor ajuste, este proceso se llevó a cabo en RStudio y Matlab, en donde se probaron las distribuciones normal, log-normal, exponencial, gamma, beta, uniforme, nakagami, gumbell, Wei-

**Tabla 2.** Frecuencias dominantes resultantes.

Muestra	Frec. dominante (Hz)	Amplitud	SST (mg/L)
M1	1054.736316	0.000174	5000.000000
M2	3834.041490	0.000217	2511.500000
M3	3304.173957	0.000173	1010.000000
M4	3314.171457	0.000213	517.500000
M5	2194.451387	0.000194	405.550000
M7	1054.736316	0.000195	277.500000
M9	3399.150212	0.000197	118.750000
M10	1754.561360	0.000173	85.000000
M11	1549.612597	0.000189	200.000000
M12	1114.721320	0.000190	160.000000
M13	3304.173957	0.000201	180.000000
M14	3434.141465	0.000211	102.400000
M15	1439.640090	0.000230	81.920000
M16	3424.143964	0.000192	65.536000
M19	1914.521370	0.000179	33.550000
M20	3244.188953	0.000195	26.840000



**Figura 3.** Frecuencias dominantes de las muestras 1 a 20. El punto en color rojo en las gráficas indica la frecuencia dominante.



**Figura 4.** Modelos de mejor ajuste para las pruebas de impacto acústico.

bull, Pareto, Gauss inversa, logística, log-logística, Birman-Sanders, Rayleigh, Rician, entre otras. Las distribuciones que mostraron mejores ajustes se muestran en la **Figura 5**, que fueron las distribuciones de probabilidad Weibull, gamma, normal, log-normal y exponencial; también se muestran las gráficas de los cuartiles Q-Q, las gráficas P-P y la función acumulada de las mismas distribuciones.

Para la selección de la distribución de probabilidad de mejor ajuste se realizaron las pruebas de Smirnov-Kolmogorov, Cramer-von Mises y Anderson-Darling. Sin embargo, estas pruebas no fueron conclusivas por lo que se utilizó la información del AIC y BIC, donde la función de mejor ajuste seleccionado por estos valores fue la distribución Weibu-

ll, como se muestra en la **Tabla 3**.

Para realizar las MCS se utilizaron los datos mostrados en la **Tabla 1**, en donde se utilizó la distribución Weibull con 10,000 muestras aleatorias. La tabla resume con la que se obtuvieron los parámetros de la distribución y la selección de la misma se muestran en la **Tabla 4**.

En la **Figura 6** se muestran los resultados de la MCS a partir de la función de distribución Weibull, en donde se obtuvieron las simulaciones de las concentraciones de SST a partir del modelo se ajuste de la Ec. 19, en donde se observa que la mayoría de los datos simulados se concentran entre valores correspondientes a 500 y 700 mg/l de éstos.

De los datos simulados se obtuvieron las medidas

**Tabla 3.** Pruebas de Bondad de Ajuste.

Test/Distribución	Normal	Log-Normal	Weibull	Gamma
Kolmogorov-Smirnov	0.3420174	0.3504564	0.3481731	0.3671685
Cramer-von Mises	0.3137123	0.3323668	0.3357772	0.3776052
Anderson-Darling	1.6999866	1.8739512	1.8985203	2.2881523
Criterio de Información de Akaike's	301.9874	306.6783	301.2221	305.3014
Criterio de Información Bayesiano	303.7681	308.4591	303.0028	307.0821

**Tabla 4.** Datos estadísticos de los datos originales.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Media	Desv. Estándar	Distribución
Frecuencia (Hz)	1054.7363	3834.0414	2458.4478	1029.9920	Weibull

**Tabla 5.** Valores de sensibilidad del modelo simulado.

	NRC	SRC	PCC	SPC	LCC	RPSS
Absorbancia	2.6286	0.9575	1	1	0.9575	-4.8618

**Tabla 6.** Valores de regresión lineal a partir de los datos originales y simulados.

Estadístico de Regresión	Datos Simulados
VIF	23.52
R <sup>2</sup>	0.917
R <sup>2</sup> ajustada	0.917
F regresión	110120
Error estándar de regresión-estimado	0.00119

de sensibilidad a partir del NRC, SRC, PCC, LCC, y RPSS del modelo lineal a partir del parámetro de entrada como se muestran en la **Tabla 5** y los valores correspondientes a la regresión lineal de los valores obtenidos a partir de la MCS se observan en la **Tabla 6**.

## Discusión

En este trabajo se utilizaron las medidas de regresión lineal y correlación como medidas de sensibilidad para determinar la eficacia del modelo propuesto para determinar el contenido de sólidos mediante pruebas de impacto acústico como técnica alternativa para determinar la concentración de SST. La metodología propuesta se basa en el algoritmo propuesto por Gemma Manache (**Figura 2**), en el cual, dependiendo de la correlación entre la MCS y

los valores obtenidos del modelo se puede utilizar esta metodología ya que como se observa en la **Tabla 6** el R<sup>2</sup> ajustada es mayor a 0.70.

De acuerdo con la metodología propuesta los valores más representativos para determinar si la variable acústica es o no importante en la determinación de SST son los valores de RPSS y los del SPC, en este caso el valor de RPSS fue de -4.86 y el de SPC de 1.0, en donde uno de los valores no fue satisfactorio (RPSS) y el otro valor si lo fue (SPC), por lo que se puede considerar la variable acústica como una variable significativa. Sin embargo, es necesario explorar las otras medidas de sensibilidad para tomar una decisión adecuada al respecto, en este caso tanto el LCC, PCC y NCR fueron valores satisfactorios que también se consideraron para determinar la variable de la frecuencia dominante como una variable relevante en la determinación de los SST.

Sin embargo, cabe mencionar que en caso de incertidumbre con el algoritmo propuesto es posible realizar un análisis adicional utilizando la metodología de transformación de datos por rango en el cual las variables de salida y entrada del modelo toman valores de y con estos valores se puede realizar una nueva correlación y ajuste lineal para determinar la significancia de las variables. En este estudio se propone el uso de esta transformación de datos para futuros estudios y mejoras del análisis de sensibilidad, no obstante, los resultados fueron satisfactorios al tener una variable que, valida la importancia de la frecuencia dominante como

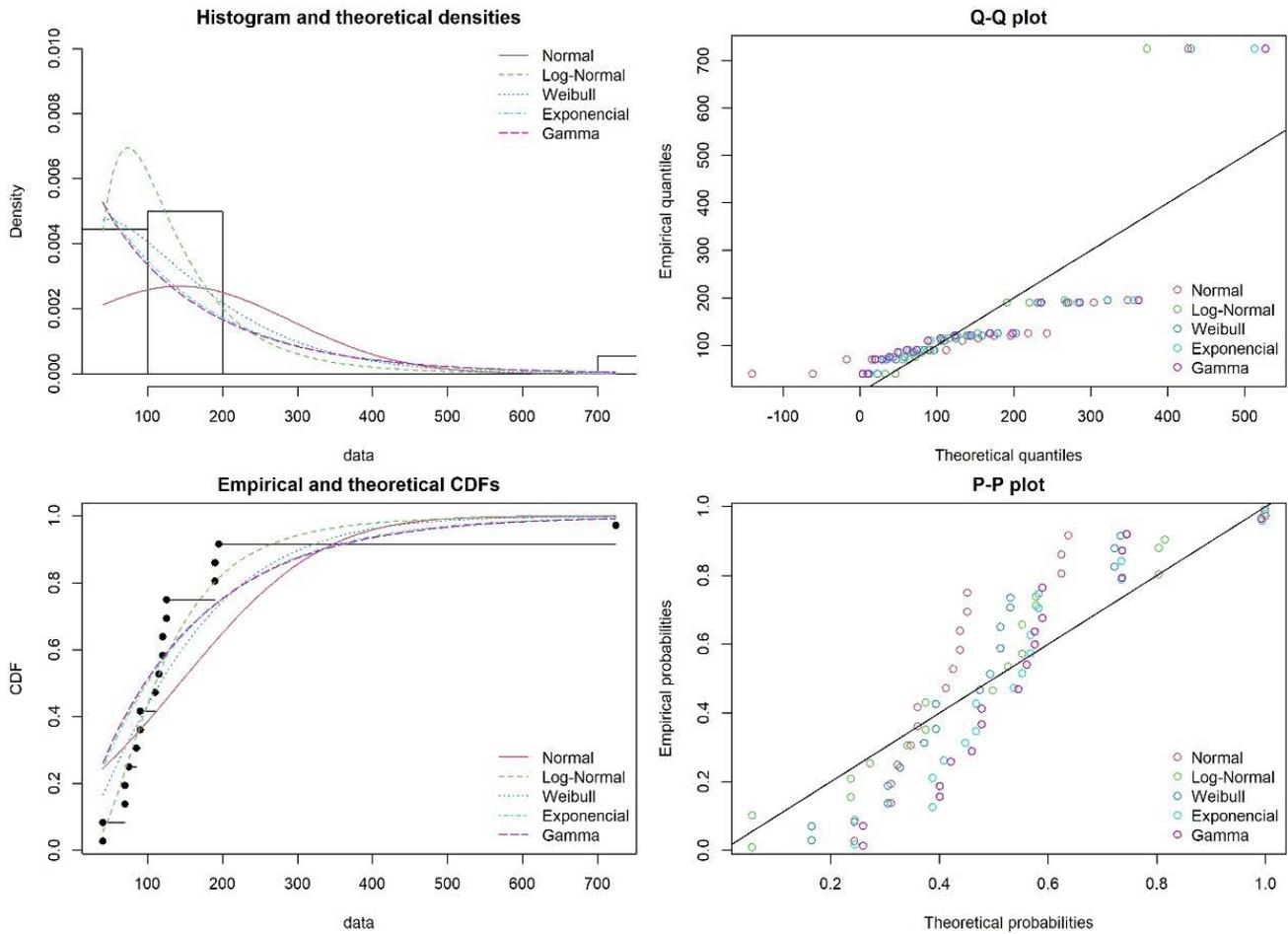


Figura 5. Funciones de distribuciones para técnicas de Impacto Acústico.

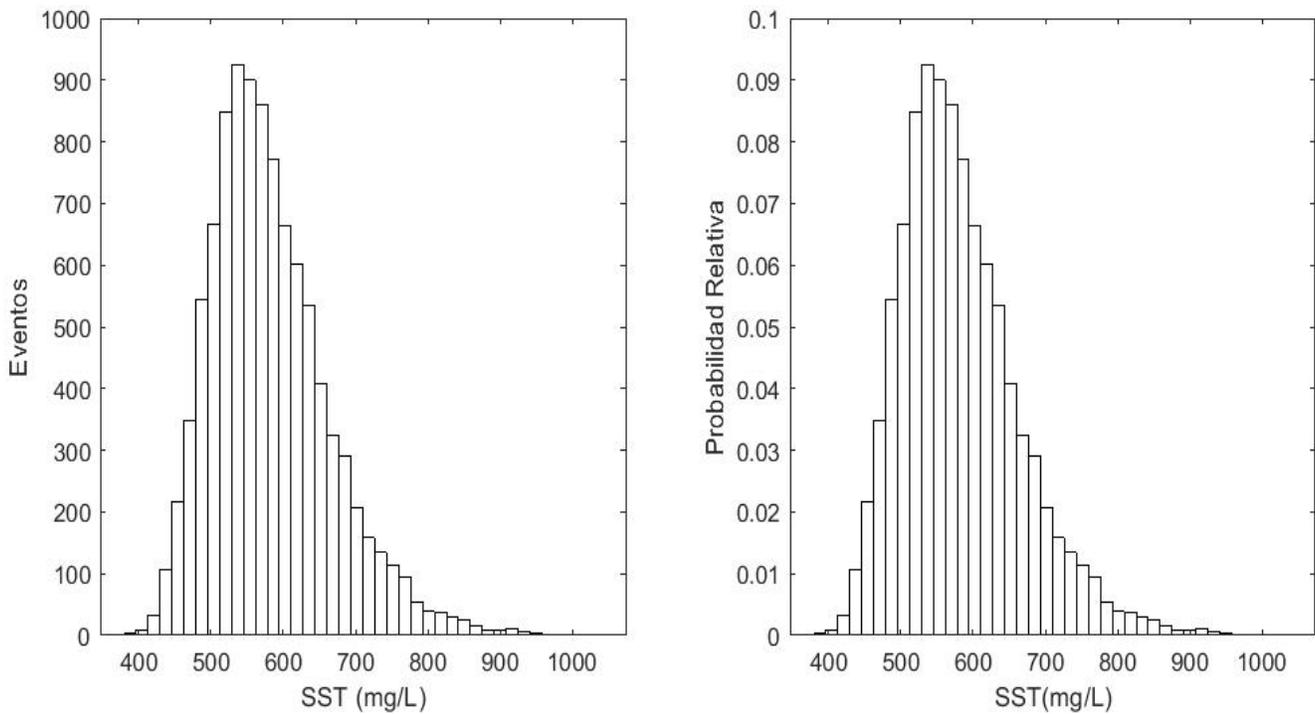


Figura 6. Simulación de 10,000 muestras con Monte Carlo.

parámetro de estimación de SST, de modo que se ratifica la técnica de impacto acústico como una herramienta eficiente para la caracterización de calidad del agua por SST.

## Conclusiones

En el presente trabajo se asociaron las medidas características de impacto acústico con los SST para generar un modelo de ajuste en la determinación de parámetros contaminantes del agua, modelo que a partir de las MCS se pudo considerar la frecuencia dominante obtenida de la FFT como una variable importante en la determinación de este parámetro. Es importante remarcar que el modelo propuesto en este trabajo, descrito por la Ec. 19, se puede mejorar si se calibra con más pruebas experimentales y se disminuyen los errores de variación entre los valores reales y los aproximados propiciados por el modelo de ajuste.

De manera general, los resultados obtenidos nos llevan a concluir que la propuesta descrita en este trabajo puede llegar a instrumentarse como técnica alternativa y complementaria para la caracterización de calidad del agua realizadas en los laboratorios químico-biológicos, teniendo como ventaja el poder implementarse sin la necesidad de equipo e instalaciones costosas, así como personal especializado.

## Referencias

Flowers-Cano R, Flowers R, Rivera-Trejo F (2014). Evaluación de criterios de selección de modelos probabilísticos: validación con series de valores máximos simulados. *Tecnología y Ciencias del Agua* V(5):189–197.

Iman RL, Conover WJ (1979). The use of the rank transform in regression. *Technometrics* 21(4):499-509. doi:https://doi.org/10.1080/00401706.1979.10489820

Iman RL, Helton JC (1988). An investigation of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models. *Risk Analysis* 8(1):71–90. doi:10.1111/j.1539-6924.1988.tb01155.x

Maierhofer C, Reinhardt H-W, Dobmann G (2010) *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures: deterioration processes and standard test methods*. 1 edn. Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781845699536

Manache G, Melching CS (2008). Identification of reliable regression- and correlation-based sensitivity measures for importance ranking of water-quality model parameters. *Environmental Modelling and Software* 23(5):549-562. doi:10.1016/j.envsoft.2007.08.001

Montgomery DC, Runger GC (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Seventh Edition. John Wiley & Sons.

Saltelli A, Ratto M, Andres T, Campolongo F, Cariboni J, Gatelli D, Saisana M, Tarantola S (2007). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons. doi:10.1002/9780470725184

Saltelli A, Andres TH, Homma T (1993). Sensitivity analysis of model output: an investigation of new techniques. *Computational Statistics and Data Analysis* 15:211-238. doi:10.1016/0167-9473(93)90193-W

Saltelli A, Homma T (1992). Sensitivity analysis for model output. Performance of black box techniques on three international benchmark exercises. *Computational Statistics and Data Analysis* 13(1):73-94. doi:10.1016/0167-9473(92)90155-9

Saltelli A, Marivoet J (1990). Nonparametric statistics in sensitivity analysis for model output: a comparison of selected techniques. *Reliability Engineering and System Safety* 28:229-253. doi:10.1016/0951-8320(90)90065-U.

Secretaría de Salud. (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. *Al*.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. (Vol. 5, pp. 1–17).

Senocak I (2020) *Scientific Computing. An Introductory Survey*. Revised Second Edition. *AIAA Journal* 59(1):417-418. doi:10.2514/1.J060261

Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD (2002). *Wastewater engineering treatment and reuse*. McGraw-Hill (p. 1846).



# Evolución histórica del análisis de peligro por inundaciones en el municipio de León, Guanajuato (2006 - 2018)

## Historical evolution of flood hazard analysis in the municipality of León, Guanajuato (2006 - 2018)

Norma Claudia Calderón Rosas\*, José de Jesús Esparza Claudio

CIATEC, A.C., Omega 201, Industrial Delta, León, Guanajuato. Tel.:477 710 00 11, Ext. 15303, Ext. 15300

### Historial

Manuscrito recibido: 1 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 23 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Norma Claudia Calderón Rosas

e-mail: ncalderon@ciatec.mx

### Resumen

La cronología de desastres por inundaciones en León data desde el siglo XVII. Dicho componente ha sido descrito en los atlas de riesgos de 2006, 2010 y 2018. El presente trabajo describe la evolución histórica del peligro por inundaciones en cada atlas. Se comparan los capítulos del componente desarrollado bajo las metodologías vigentes para cada versión. Los resultados muestran que la información climatológica e hidrológica fueron cruciales en la calibración de modelaciones (1D y 2D) en HEC-RAS. Sin embargo, la constante actualización de información topográfica de precisión es trascendental en las modelaciones 2D para determinar llanuras de inundación, y con ello, desarrollar la vulnerabilidad y riesgo del componente.

**Palabras clave:** peligro, inundaciones, atlas de riesgos, municipio de León.

### Abstract

The chronology of flood disasters in León dates back to the 17th century. This component has been described in the 2006, 2010 and 2018 risk atlases. This paper describes the historical evolution of the flood hazard in each atlas. The chapters of the component developed under the current methodologies for each version are compared. The results show that climatological and hydrological information were crucial in the calibration of modeling (1D and 2D) in HEC-RAS. However, the constant updating of accurate topographic information is transcendental in the 2D modeling to determine flood plains, and thus develop the vulnerability and risk of the component.

**Keywords:** hazard, floods, risk atlas, municipality of León.

### Introducción

De todos los fenómenos naturales que ocurren en el planeta, las inundaciones son consideradas como el fenómeno más dañino en cuanto a personas afectadas (Capacci y Mangano, 2015), como se observa en la **Tabla 1**.

La cantidad de eventos por inundaciones ha crecido vertiginosamente, así como de manera puntual en áreas urbanas donde se presentan impactos negativos dentro de los sectores social, de servicios, económico y financiero, dejando vulnerables principalmente a la población de escasos recursos. De acuerdo a las cifras tanto del Centro Nacional

de Prevención de Desastres (CENAPRED) como del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), cerca del 41% del territorio nacional se encuentra expuesto a fenómenos hidrometeorológicos (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2016).

En el periodo 2000-2023, se registraron 1,140 declaratorias de emergencia, desastre y/o contingencia climatológica por inundaciones en todo el territorio nacional, afectando principalmente a los estados de Veracruz, Tabasco y Chihuahua; el estado de Guanajuato se posicionó en el lugar número 16 dentro del periodo mencionado con 12 declaratorias, como se puede observar en la **Figura 1**.

**Tabla 1.** Impacto humano por tipo de desastres (promedio 1992-2021 versus año 2022).

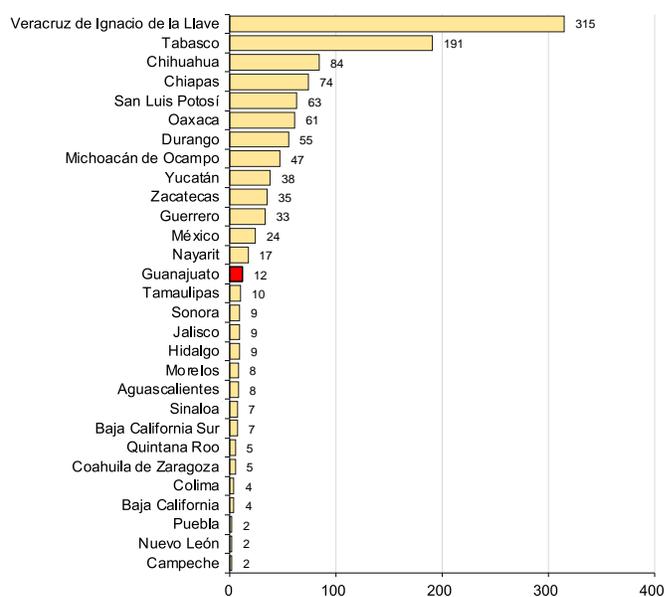
Defunciones		Fenómeno ocurrido	Personas afectadas		
1992-2021	2022		1992-2021	2022	
83	76		Incendio forestal	0.6	2
109	6		Actividad volcánica	0.2	1
8,788	1,582		Tormenta	32M	17M
6,740	8,038		Inundación	96M	58M
876	403		Deslizamiento de ladera	0.2	0.1
6,040	16,416		Temperatura extrema	4M	0.08
26,074	1,626		Sismo	5M	4M

Adaptado de Emergency Events Database EM-DAT (<https://www.emdat.be/>).

El municipio de León se encuentra ubicado al noroeste del estado de Guanajuato; la primera urbe se estableció en la zona del valle, o Bajío Guanajuatense, alrededor del año 1580, sin embargo, su mayor crecimiento se da en la década de 1980, ya que, por su ubicación geográfica, se empieza a consolidar como polo comercial a nivel nacional. De acuerdo a datos cartográficos, ha incrementado su superficie en un 90% (en 1993 el área urbana era de 12 mil 148 ha y en 2019 de 23 mil 083 ha), (IMPLAN, Instituto Municipal de Planeación, 2020). Dicho crecimiento ha sido hacia el norponiente y oriente de la ciudad principalmente (**Figura 2**).

En cuanto a su topografía e hidrografía, en el municipio se distinguen tres zonas (**Figura 3**):

**Zona 1:** al norte del municipio, dominada por serranía con relieve accidentado y, por ende, con un

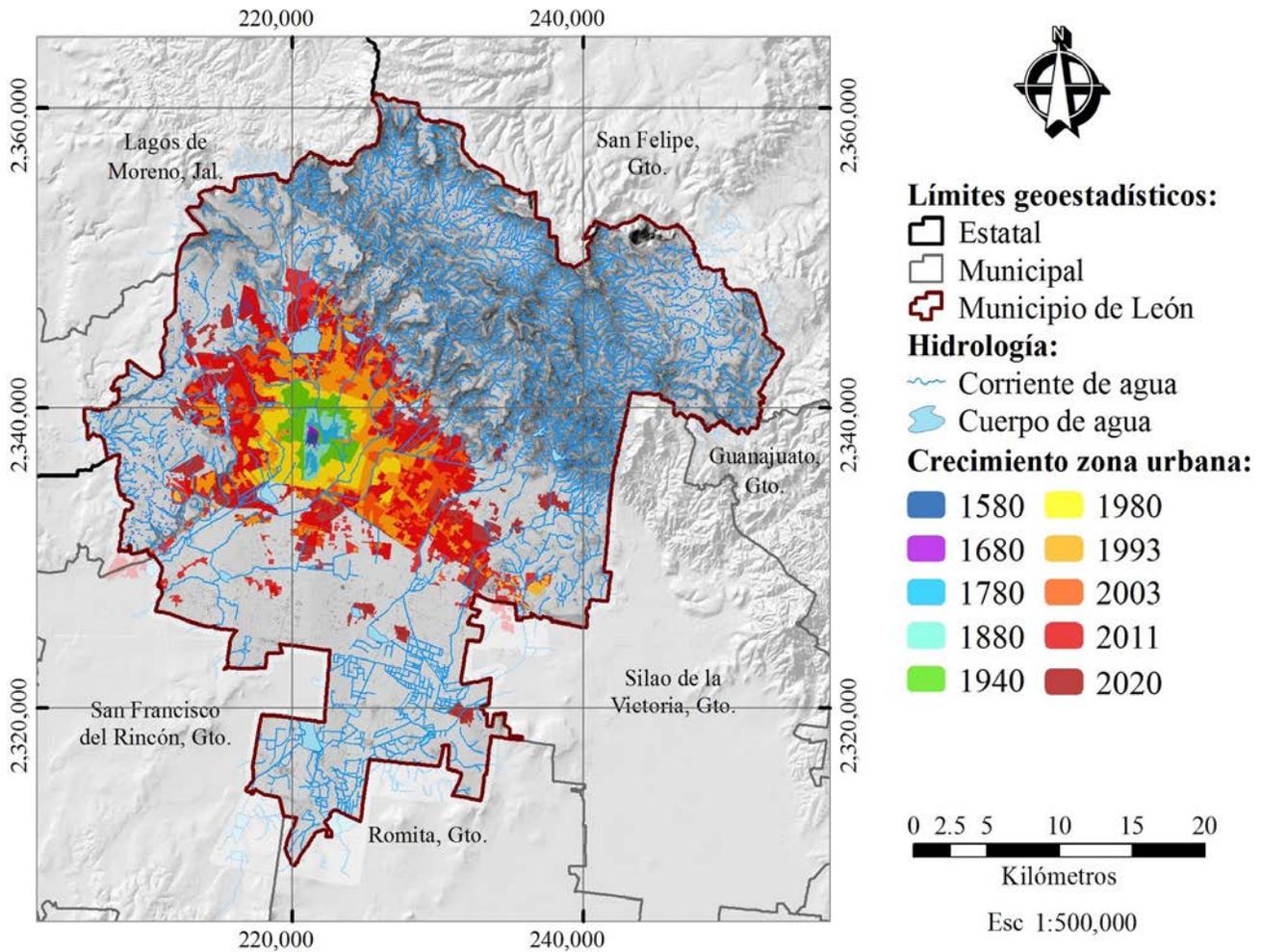


**Figura 1.** Declaratorias de emergencia en México por inundaciones dentro del periodo 2000 y 2023 (CENAPRED, 2023).

gran número de arroyos tributarios con dirección NE-SW principalmente, mismos que desembocan hacia presas como El Palote, Media Luna, Ojo de Agua de Reyes, Echeveste, entre otras; esta característica ha frenado el crecimiento urbano por la identificación de zonas con problemática de deslizamiento de laderas.

**Zona 2:** ubicada al centro y dominada por llanuras y lomeríos bajos, comprende la mancha urbana, así como las principales corrientes de agua provenientes de la serranía, como el Río de Los Gómez, el cual corre desde la salida de la Presa El Palote hacia la zona centro y posteriormente hacia el poniente de la zona urbana (**Figura 3**). A su paso, capta los escurrimientos de otras corrientes como son: Granizo, Penitente, El Muerto, Ejido, Alfaro, Las Liebres, La Tinaja, Timoteo Lozano, Chichihuas, Mariches, Las Joyas, Hondo, entre otros.

**Zona 3:** al sur del municipio, dominada por planicies las cuales, actualmente, conservan su vocación agrícola con la identificación de algunas corrientes (Tajo de Santa Ana, Los Tepetates, Canal Santa Rosa, entre otros), así como una gran cantidad de canales de riesgo; esta zona también se caracteriza



**Figura 2.** Crecimiento de la zona urbana del municipio de León, de 1580 al 2020. Figura elaborada con datos geoespaciales de INEGI, 2020.

por presentar problemática de subsidencia dada la sobreexplotación de los acuíferos por la actividad agrícola.

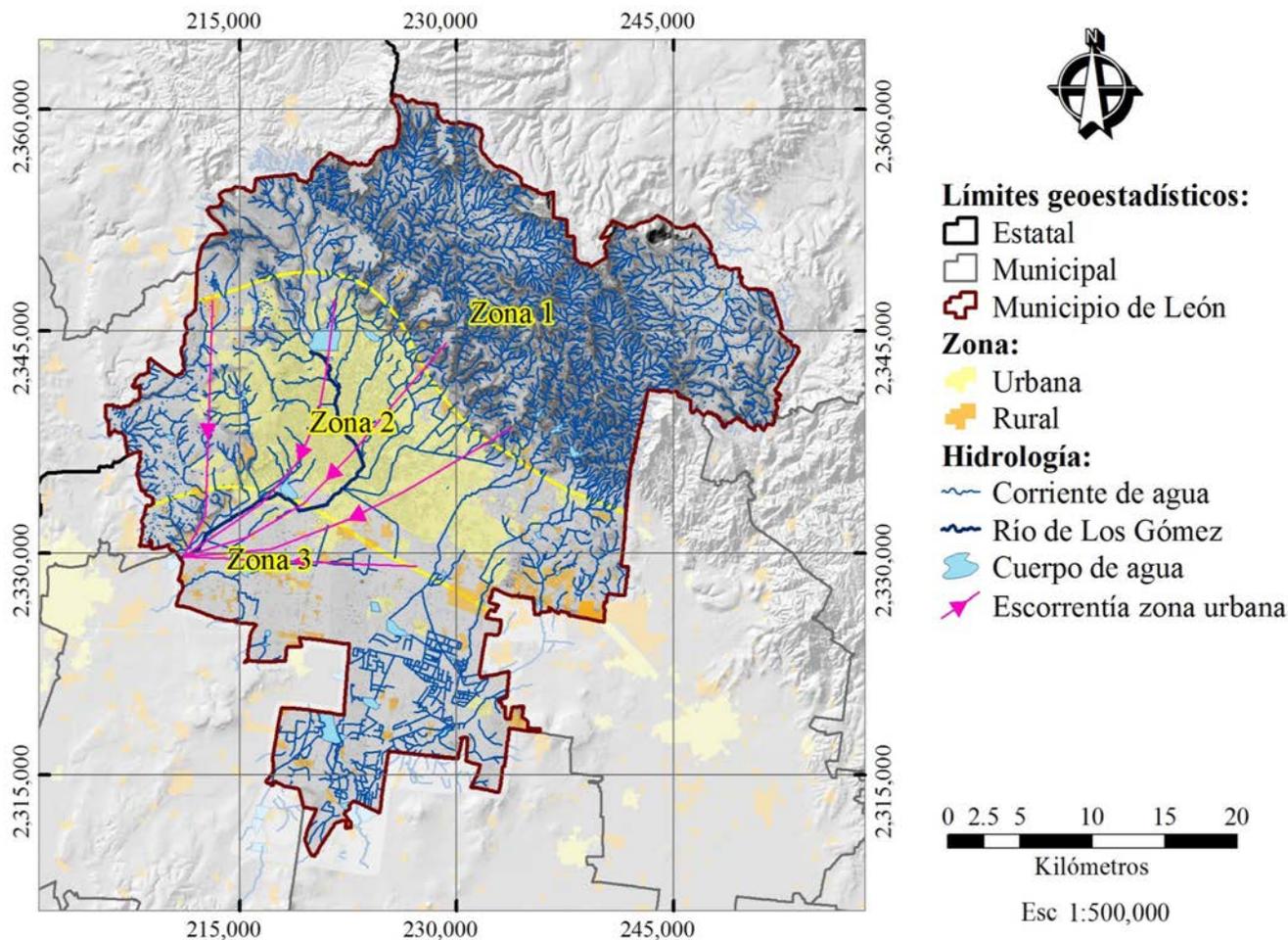
Dentro de la cronología de desastres ocurridos en el municipio de León destacan las inundaciones, muchas de ellas acontecidas anualmente y un buen número no tan continuas pero significativas por los daños provocados (**Tabla 2**).

Las causas de los mencionados desastres se repetían con frecuencia: precipitaciones pluviales de exagerada abundancia, descuido en la atención preventiva en desazolve de arroyos y del Río de Señora o de Los Gómez (corriente de agua que atraviesa la zona urbana del municipio), el que casi siempre en temporada de lluvias derramaba sus aguas (Navarro Valtierra, 2010).

De acuerdo a los indicadores municipales de peligro (CENAPRED, 2023), la totalidad del territorio de León está catalogado con peligro alto en cuanto a inundaciones (**Figura 4**); por otro lado, la Coordinación Estatal de Protección Civil de Guanajuato, en su portal geográfico, menciona la existencia de algunos polígonos (cercaos a

**Tabla 2.** Inundaciones históricas ocurridas en el municipio de León, Guanajuato.

Siglo	Año de ocurrencia
XVII	1637, 1649
XVIII	1749, 1762
XIX	1803, 1865, 1888
XX	1911, 1926, 1971, 1973 y 1998



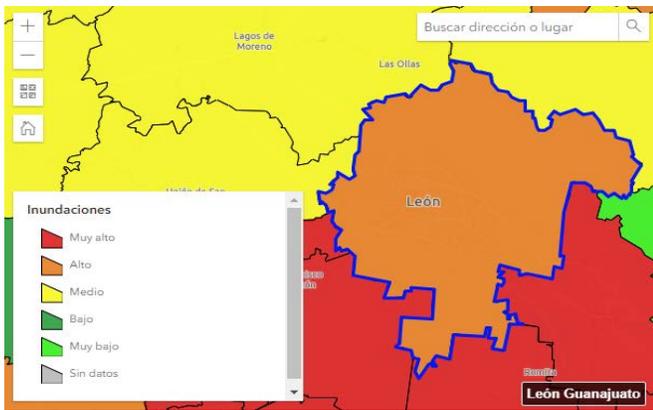
**Figura 3.** Descripción topográfica e hidrográfica del municipio de León. Figura elaborada con datos geospaciales de INEGI, 2020.

presas) e infraestructura hidráulica (**Figura 5**) con problemática de inundaciones fluviales (SSPG, 2023).

No obstante, los atlas de riesgos del municipio de León, en sus versiones 2006, 2011 y 2018, fueron desarrollados bajo metodologías de análisis vigentes en su respectivo año, con el objetivo de identificar y clasificar puntualmente las zonas de peligro por inundaciones fluviales bajo los niveles de peligro muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. El primer esbozo, en cuanto a la gestión de riesgos del municipio, se desarrolló en el año 2002; en dicho documento únicamente se identificaron componentes naturales y antropogénicos. En el atlas de riesgos del año 2006, dentro del fenómeno hidrometeorológico, se desarrolló el componente de inundaciones de acuerdo a las metodologías de

CENAPRED. Posteriormente, en el documento del atlas del año 2010, se desarrolla el componente con las metodologías de SEDESOL, y finalmente en la actualización en 2018, con las metodologías vigentes de CENAPRED.

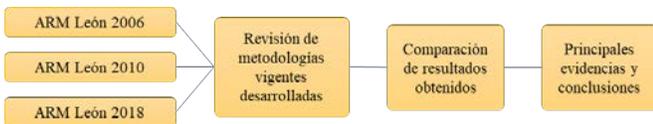
Bajo este contexto histórico, el presente trabajo describe la evolución metodológica de peligro por inundaciones fluviales, el cual parte desde la integración de información climatológica, hidrológica y topográfica para la calibración de modelaciones en una dimensión con el fin de determinar zonas de peligro adyacentes a los cauces de los principales arroyos en la zona urbana del municipio de León (IMPLAN, 2006), hasta el uso de información lidar, o topografía de alta resolución con el mismo fin pero ahora en modelaciones en dos dimensiones, y la obtención de llanuras de inundación más puntua-



**Figura 4.** Clasificación de peligro por fenómeno para el municipio de León (CENAPRED, 2023).



**Figura 5.** Identificación de zonas con problemática de inundaciones fluviales en el municipio de León (SSPG, 2023).



**Figura 6.** Metodología utilizada.

les de acuerdo a la integración de un modelo digital de elevación de precisión.

## Materiales y métodos

La metodología aplicada para el presente trabajo corresponde al análisis de los capítulos relativos al componente de inundaciones para las versiones de los atlas 2006, 2010 y 2018, como se muestra en la **Figura 6**.

En la **Tabla 3**, se mencionan las metodologías desarrolladas para el componente de inundaciones fluviales de acuerdo a cada versión del atlas. De manera evolutiva, se resalta la mejora en cuanto a la disposición de información topográfica, desde el uso de los primeros modelos digitales de elevación elaborados por INEGI, hasta la disponibilidad de información tipo lidar, así como los avances tecnológicos en cuanto al software utilizado llamado HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System), el cual es un programa de modelación hidráulica para flujo en régimen permanente y no permanente en cauces naturales o canales artificiales, y cuyo objetivo es determinar las posibles zonas inundables (HEC, 2023); dicho programa se ha mantenido en constante actualización desde su creación en el año 1968, con la versión 0, hasta la versión actual 6.5.

En cambio, en el tema relativo a datos del clima, en palabras de Landa *et al.* (2017), “se tienen aún serias limitaciones para producir información de calidad. Muchas de las herramientas de predicción del tiempo y clima que se emplean en la toma de decisiones carecen de elementos científicamente sustentados”.

## Resultados

En la versión del atlas de riesgos 2006, en el apartado de inundaciones fluviales se desarrollaron los siguientes puntos:

**Tabla 3.** Metodología desarrollada para el componente de inundaciones fluviales por versión.

Versión	Metodología	Fuente
2006	Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos	(CENAPRED, Archivos, 2006)
2010	Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo	(SEDESOL, 2010)
2018	Guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos	(CENAPRED, 2016)

- Compilación, análisis y síntesis de la información hidrometeorológica disponible para el municipio de León.
- Revisión y corrección en su caso de las limitaciones de las microcuencas en el municipio de León.
- Clasificación de los ríos del municipio de León de acuerdo al orden de corrientes y criterios establecidos por CENAPRED.
- Cálculo de los gastos hidráulicos por cuenca para períodos de retorno de 50, 100, 500 y 1,000 años.
- Elaboración de mapas referentes a peligros por

inundaciones.

Bajo este contexto, a continuación, se presenta la modelación del arroyo El Muerto, el cual nace en la parte noreste del municipio hasta su confluencia con el Río de Los Gómez (corriente principal del municipio de León). El mapa fue elaborado con base en la información topográfica disponible en su momento, levantamientos topográficos en las estructuras hidráulicas con problemática de desbordamiento y los cálculos hidráulicos con la información disponible (**Figura 7**). Si bien se observan los niveles de peligro (alto, medio y bajo) la configura-

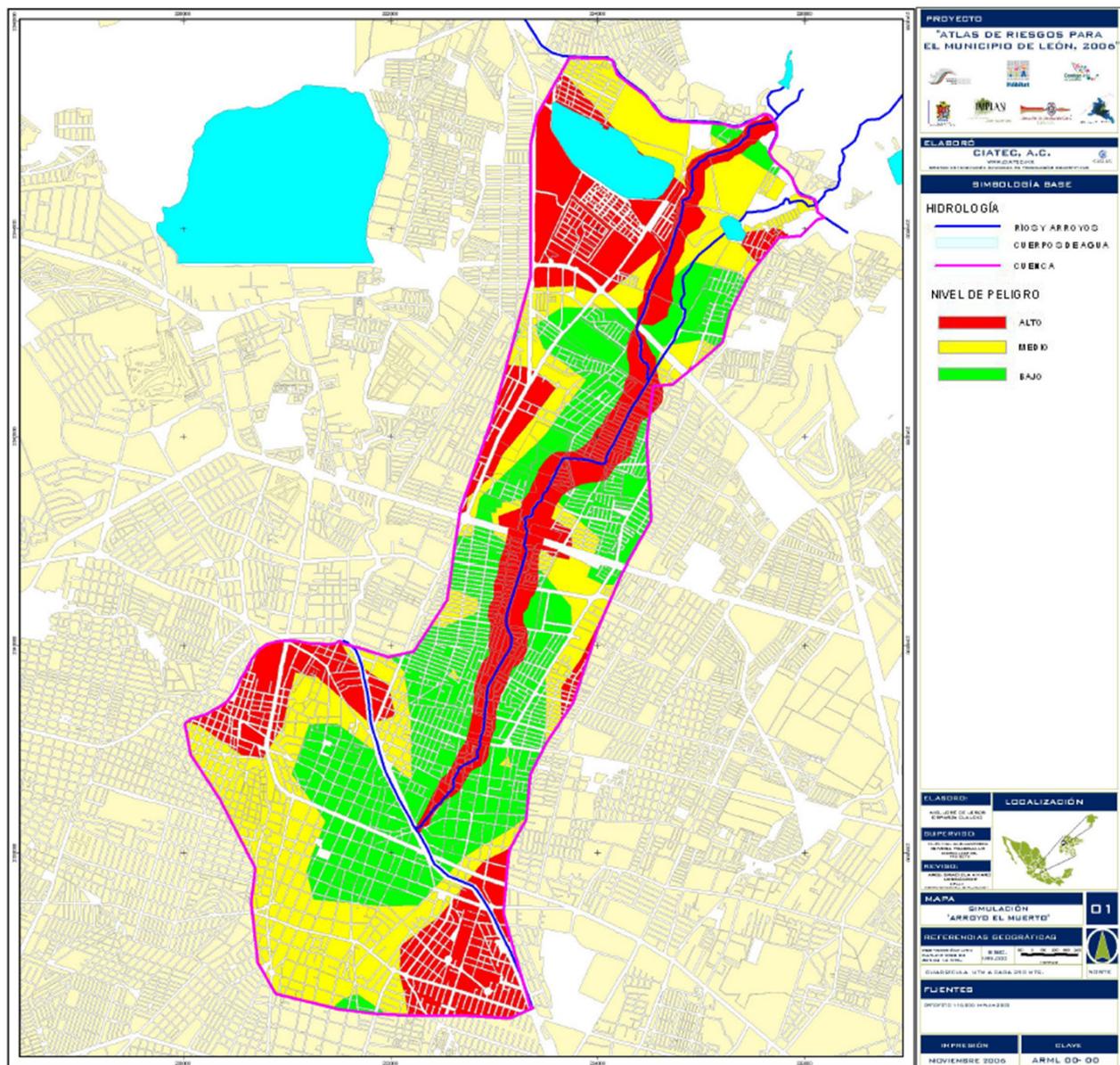


Figura 7. Simulación del arroyo El Muerto (IMPLAN, 2006).

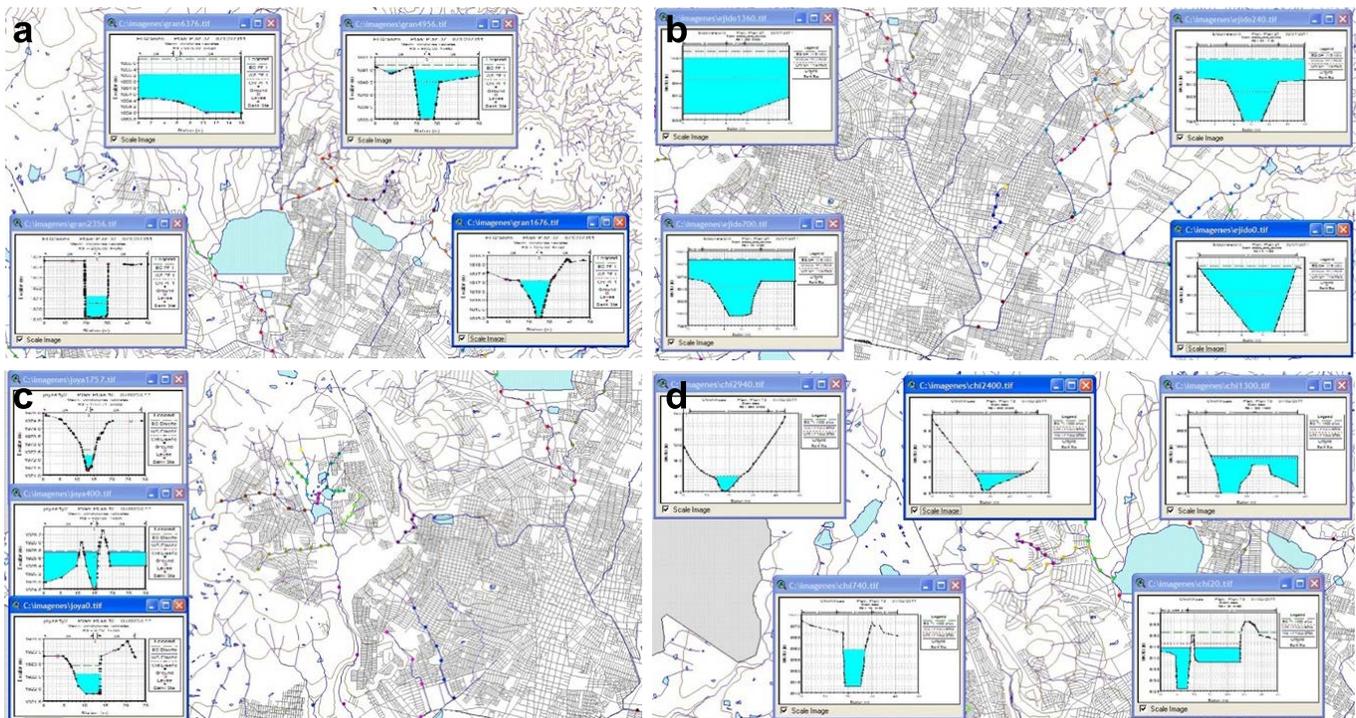
ción de los polígonos obedece a límites establecidos por las dimensiones de las manzanas (nivel medio y bajo), y en lo que respecta a las márgenes de los ríos, la delimitación obedece a una primera calibración de simulación en una dimensión bajo el uso del programa HEC-RAS, el cual resulta ser adecuado para el estudio de flujos con un marcado carácter unidimensional, utilizándose básicamente para la modelización de ríos y canales en los cuales la geometría se puede definir por una línea o cauce longitudinal con una sección transversal asociada en cada punto a través del seccionamiento topográfico.

En la versión del atlas de riesgos 2010, en el apartado de inundaciones fluviales se integró la nueva delimitación de la zona urbana, así como la modelación de más arroyos como lo fueron Los Castillos, El Salto, Sardeneta, El Ejido, Granizo, Hondo, Las Joyas, La Patiña, El Hueso, Las Liebres, Magisterial, Los Naranjos, Otates, entre otros. De cada uno de éstos se presentaron los cálculos y modelaciones en una dimensión (**Figuras 8 y 9**), con el propósito de actualizar el mapa de peligro por inundaciones. Para la calibración de este modelo, se utilizó información topográfica proveniente de un

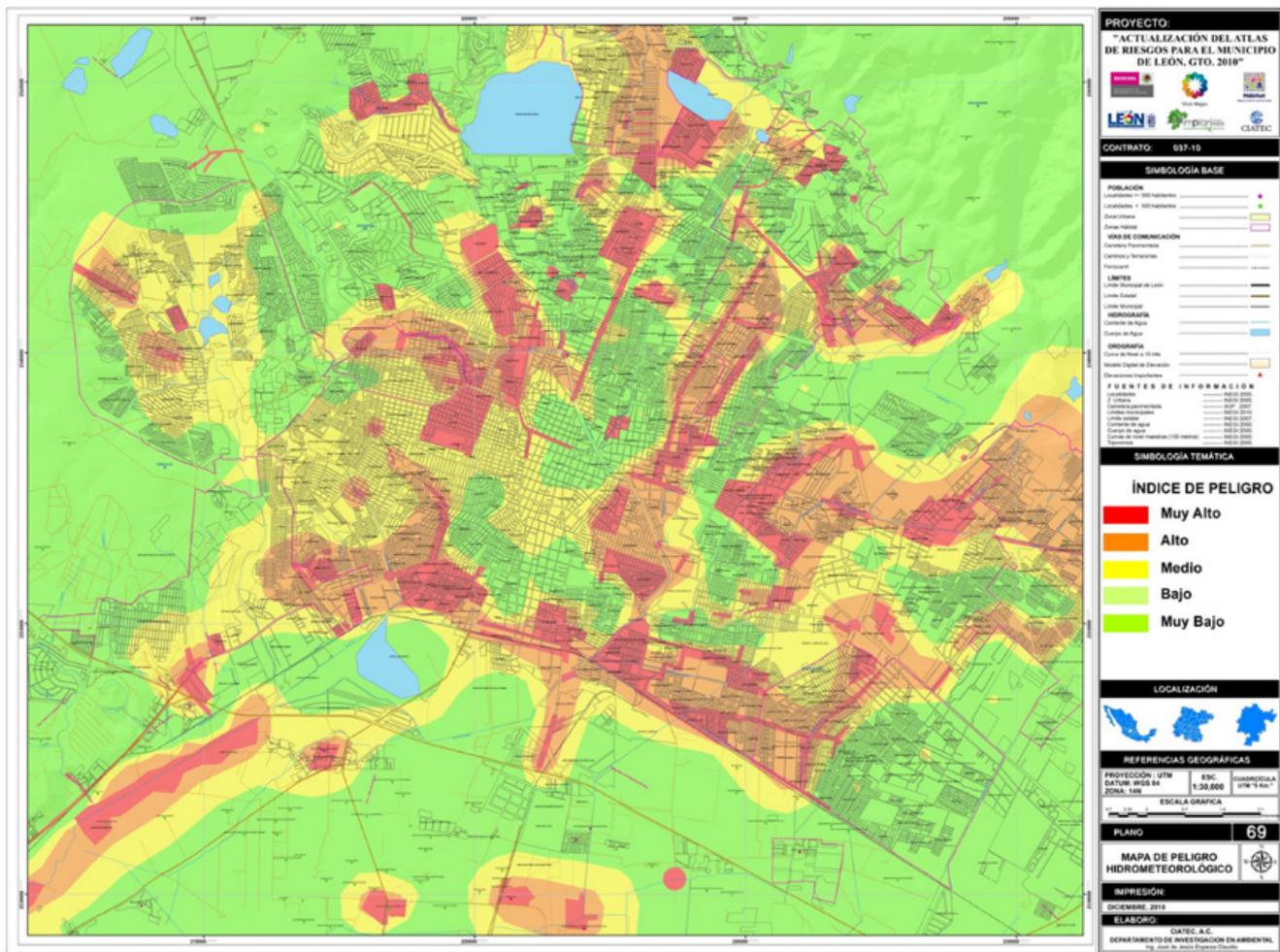
modelo digital de elevación con una resolución a 5 metros, por lo que se complementó su análisis con levantamientos topográficos en puntos clasificados con problemáticas de desbordamiento; estos levantamientos se realizaron 500 metros aguas arriba y aguas abajo de estructuras hidráulicas.

Finalmente, en la versión 2018 del atlas de riesgos del municipio de León, se contó con información tipo lidar (formado por nubes de puntos clasificados) de toda la zona urbana, con la cual se logró simular a una mejor resolución el comportamiento hidráulico de los arroyos Alfaro (**Figura 10a**), Hondo (**Figura 10b**), Las Liebres (**Figura 10c**), El Muerto (**Figura 10d**), canal Timoteo Lozano (**Figura 10e**) y Magisterial (**Figura 10f**), todos ellos ubicados en la zona geotécnica del Valle de León, es decir zona de baja pendiente y, por ende, propensa a la ocurrencia de inundaciones.

La mayor ventaja de la modelación en 2D es que a partir de una malla generada desde información de Modelos Digitales de Elevaciones del Terreno (MDT), se logra estudiar celda por celda qué ocurre y cómo se comporta el flujo en ella, es decir, hacia dónde se dirige. La mayor desventaja ocurrida



**Figura 8.** Simulación de secciones de arroyos para el atlas 2010. **a)** Sardeneta, **b)** Magisterial, **c)** Las Joyas, **d)** La Patiña (IMPLAN, Actualización del Atlas de Riesgos del municipio de León 2010).



**Figura 9.** Mapa de peligro hidrometeorológico para el atlas 2010 (IMPLAN, Actualización del Atlas de Riesgos del municipio de León 2010).

durante la modelación en este atlas fue la capacidad de procesamiento por el programa utilizado, el cual puede tardar horas, incluso días, ello debido al detalle de la información topográfica y los datos hidrológicos e hidrométricos suministrados.

Adicionalmente, se elaboró un mapa de peligro con las modelaciones, así como datos proporcionados por el organismo operador de agua del municipio, y el propio IMPLAN (**Figura 11**). Si bien en este mapa la superficie con clasificación de peligro alto es menor a la versión del atlas 2010, los polígonos fueron obtenidos con apego a datos topográficos más reales.

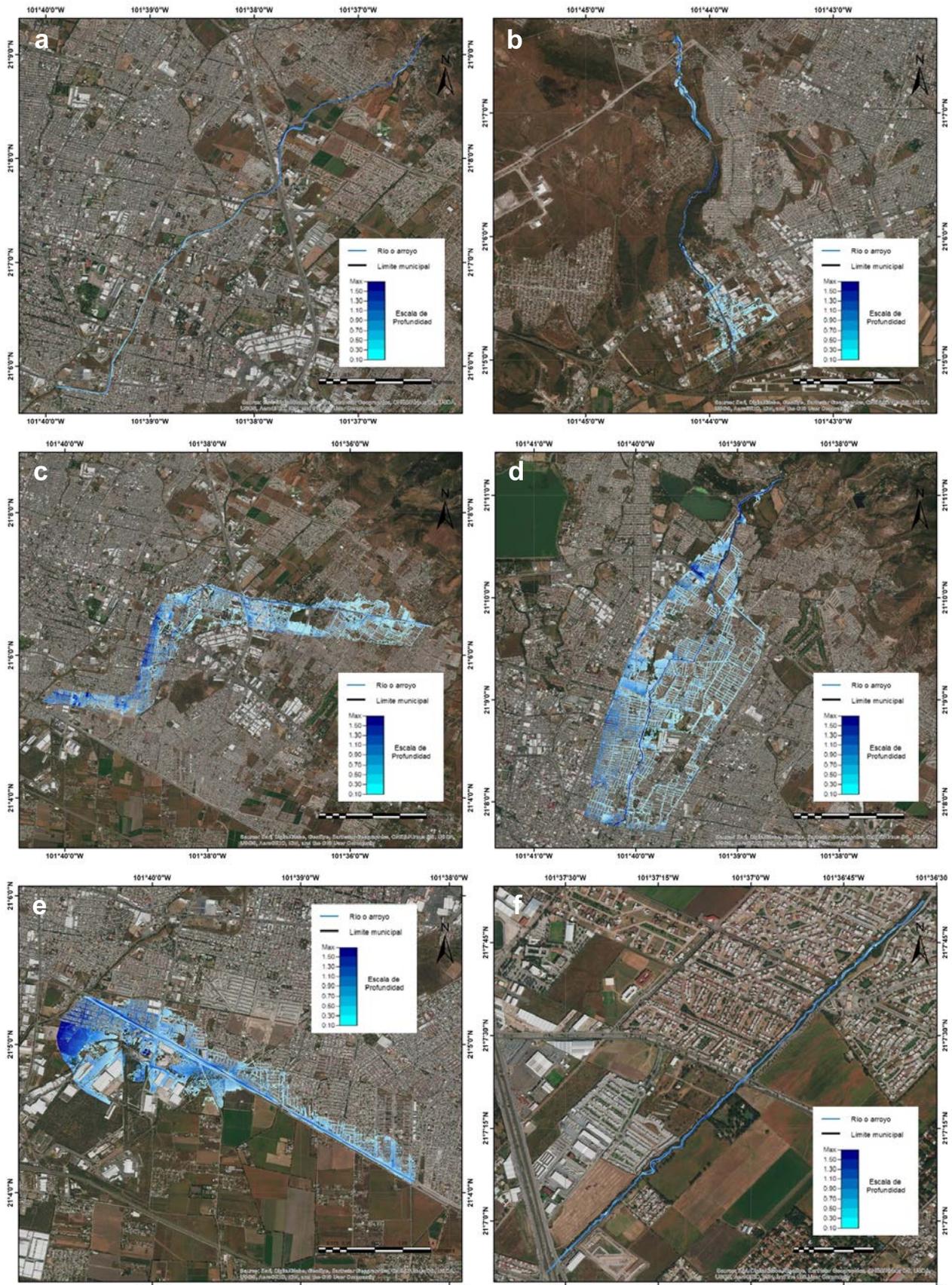
### Conclusiones

El uso de sistemas de información geográfica ha sido indispensable en la gestión de riesgos por su

capacidad de visualización y procesamiento de fenómenos espaciales, los cuales en conjunto con la evolución de las versiones del programa HEC-RAS, posibilitan la generación de información relevante en etapas tempranas de prevención de riesgos, planificación y ordenamiento territorial a nivel urbano.

En la modelación de ríos puede ser necesario recurrir a un modelo 2D cuando existen meandros fuertes con llanuras de inundación importantes. En dichas geometrías, para el cálculo de aguas bajas se puede utilizar un modelo 1D, pero para el caudal de avenida la dirección del flujo deja de seguir el cauce principal, inundando las llanuras adyacentes para circular por el cauce de aguas altas, mucho más rectilíneo y ancho que el cauce principal.

Otro caso en el que se debe recurrir a la



**Figura 10.** Modelación del comportamiento hidráulico del a) arroyo Alfaro, b) arroyo Hondo, c) arroyo Las Liebres, d) arroyo El Muerto, e) canal Timoteo Lozano, f) arroyo Magisterial, ubicados en la zona geotécnica del Valle de León.

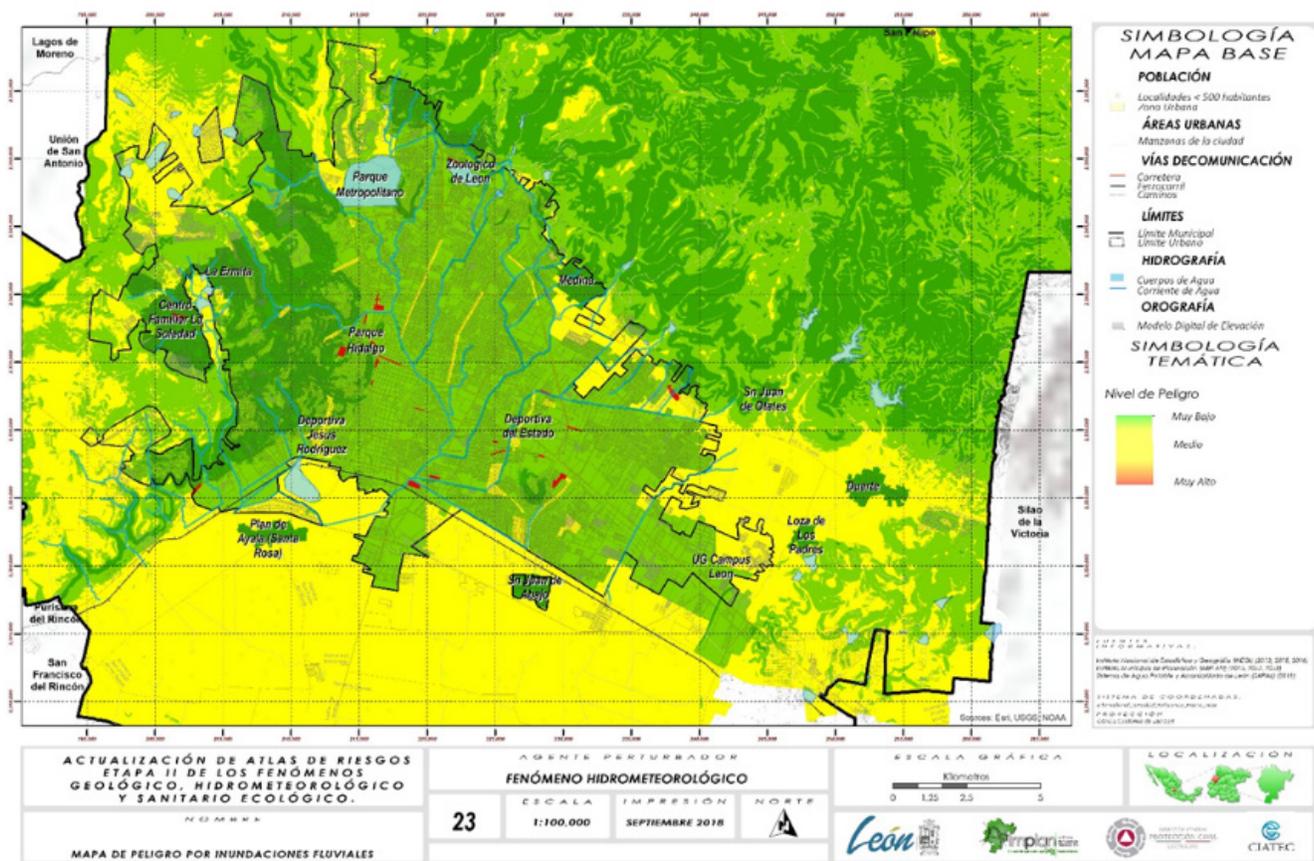


Figura 11. Mapa de peligro por inundaciones versión 2018 (IMPLAN, 2018).

modelización bidimensional en ríos es en el estudio de tramos cortos en los que existen ensanchamientos y estrechamientos de sección que pueden provocar, en función de las condiciones de caudal, zonas de recirculación importantes, que también suelen aparecer para determinadas condiciones de marea en la desembocadura de ríos en estuarios, y que reducen la sección efectiva de desagüe, provocando un aumento de velocidad en el resto de la sección.

Hasta no hace mucho, en general se trabajaba sólo con modelos 1D. Afortunadamente, la implementación y desarrollo de computadoras con procesadores cada vez más potentes han empezado a hacer posible que se extienda el desarrollo y uso de software en modelización hidráulica 2D, sin embargo, ello implica invertir en equipo que soporten dichos procesos.

Finalmente, el avance tecnológico en cuanto a la recopilación de datos topográficos de precisión, ha logrado que el análisis de riesgos sea cada

vez más puntual en cuanto a la determinación de zonas de peligro, y nos solamente en el tema hidrometeorológico, sino también para los fenómenos antropogénicos. Prueba de ello, son la identificación de las llanuras de inundación para diferentes periodos de retorno de manera puntual, como se observa en los mapas anteriores. Si bien los modelos 1D son ampliamente usados y dan resultados precisos en el cauce principal del río, son menos exactos para modelar el flujo de desbordamiento sobre las márgenes hacia las planicies adyacentes; en contraste los modelos 2D son la tecnología de punta para la modelación de inundaciones, sin embargo, estos modelos tienen la desventaja de que su aplicación está limitada por los altos requerimientos de datos, hardware y software.

A manera de resumen, los resultados obtenidos para el atlas del 2006 y 2010 son producto de simulaciones con la limitante en cuanto a disposición de información topográfica de precisión para la

construcción de modelos digitales de elevación (MDE), así como de superficie (MDS), lo cual afecta en la simulación de las zonas de desborde y llanuras de inundación. En el tema de calibración de modelos en HEC-RAS, las 3 versiones de los atlas de riesgos (2006, 2010 y 2018), aun presentan limitantes por la calidad y continuidad histórica de las bases de datos climatológicos, hidrométricos e hidrológicos en el área de estudio, así como la constante actualización de información vectorial relativa al uso de suelo con el fin de identificar los coeficientes de escurrimiento a escalas precisas.

## Agradecimientos

Agradecemos la confianza del Instituto de Planeación del municipio de León (IMPLAN), quienes desde 2006 han permitido a CIATEC, A.C., colaborar en materia riesgos con el desarrollo y actualización de los atlas de riesgos.

## Referencias

Alcocer-Yamanaka VH, Rodríguez-Varela JM, Bourguett-Ortiz VJ, Llaguno-Guilberto OJ, Albornoz-Góngora PM (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(5):33-55.

Capacci A, Mangano S (2015). Las catástrofes naturales. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24(2):35-51. doi:10.15446/rcdg.v24n2.50206

CENAPRED. (1 de Noviembre de 2006). *Archivos*. Recuperado el 1 de Agosto de 2023, de Documentos: [http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/material\\_apoyo.html](http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/material_apoyo.html)

CENAPRED (1 de Diciembre de 2016). Recuperado el 11 de Mayo de 2023, de <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/descargas.html>

CENAPRED (20 de Junio de 2023). Obtenido de <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/portal/Apps/Municipios/>

[atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/portal/Apps/Municipios/](http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/portal/Apps/Municipios/)

Navarro Valtierra CA (2010). Llegar a ser. Monografía del Municipio de León. *Gobierno del Estado de Guanajuato*.

HEC (20 de 08 de 2023). *U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center*. Obtenido de HEC-RAS: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

IMPLAN (2006). Obtenido de [http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/HABITAT/vr\\_Atlas\\_leon.pdf](http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/HABITAT/vr_Atlas_leon.pdf)

IMPLAN (2010). *Actualización del Atlas de Riesgos del municipio de León 2010*. León: IMPLAN. Obtenido de <https://dga-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/atlas%20elab%20municipios/Atlas%20de%20Riesgos%20Leon/02%20CAPITULOS%201%20a%206.pdf>

IMPLAN (2018). Obtenido de <https://www.implan.gob.mx/pdf/estudios/resiliencia/Atlasde-riesgo-del-Municipio-leon-2018.pdf>

IMPLAN (11 de Mayo de 2020). *Instituto Municipal de Planeación*. Obtenido de Estudios: <https://www.implan.gob.mx/pdf/estudios/cambios/Indice-de-Biodiversidad-Urbana-de-la-ciudad-de-Leon.pdf>

INEGI (20 de 04 de 2020). *INEGI*. Obtenido de Medio Ambiente: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>

Landa R, Magaña V, Neri C (Febrero de 2017). *UNAM*. Obtenido de Centro de Ciencias de la Atmósfera: <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2017/12/agua-y-clima.pdf>

SEDESOL (20 de Septiembre de 2010). *Gobierno de México*. Recuperado el 11 de Mayo de 2023, de Documentos: <https://es.scribd.com/document/51775401/Base-Estandarizacion-Atlas-Riesgos-SEDESOL>

SSPG (20 de 09 de 2023). *Coordinación Estatal de Protección Civil*. Obtenido de Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Guanajuato: <https://experience.arcgis.com/experience/1baeec9e3b454ad689787ae2b7dceec2/>



# Evaluación de la problemática de abastecimiento y saneamiento de agua en el área periurbana del poniente de la ciudad de San Luis Potosí

## Evaluation of the problem of water supply and sanitation in the peri-urban area of the west of the city of San Luis Potosí

Juan José Félix Carrillo, Cristóbal Aldama Aguilera\*<sup>ID</sup>, Rodolfo Cisneros Almazán<sup>ID</sup>, Hermann Rocha Escalante<sup>ID</sup>, Luis Armando Bernal Jácome<sup>ID</sup>

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Dr. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria Poniente, C.P. 78290. San Luis Potosí, S.L.P.

### Historial

Manuscrito recibido: 2 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Cristóbal Aldama Aguilera

e-mail: cristobal.aldama@uaslp.mx

ORCID: 0000-0002-5174-0741

### Resumen

La zona periurbana poniente de la ciudad de San Luis Potosí tiene graves problemas de abastecimiento y saneamiento de agua, y pese a los esfuerzos aplicados en la construcción de infraestructura para resolverlos, el problema es que sus pobladores siguen sin el vital líquido y con problemas de contaminación por las aguas residuales generadas sin tratamiento. El artículo pretende evaluar las condiciones actuales de abastecimiento y saneamiento de agua, que permitan aplicar sistemas basados en la naturaleza y un modelo WEAP que generen escenarios de demanda, disponibilidad y calidad del agua. Esta evaluación muestra la deficiencia de la infraestructura, la inexistencia de tratamiento de agua residual y la contaminación de caudales ecológicos.

**Palabras clave:** Calidad de agua, Modelo WEAP, Agua potable, SUDS, SbN.

### Introducción

Desde el año 2007, en la historia de toda la humanidad la población en zonas urbanas superó a la rural, por lo que las condiciones de urbanización necesitan ser reformadas con el fin de mantener las condiciones económicas y sociales estables (ONU-Habitat, 2018). El acceso al agua potable y al saneamiento adecuado es un derecho humano fundamental y un pilar para el desarrollo sostenible de las comunidades (OMS, 2022). El área periurbana del poniente de San Luis Potosí se enfrenta a un problema sig-

### Abstract

The periurban western area of the city of San Luis Potosí faces serious problems with water supply and sanitation. Despite efforts made to construct infrastructure to address these issues, the problem remains that their inhabitants continue to lack access to clean water and contamination from untreated wastewater. This article aims to evaluate the current conditions of water supply and sanitation to identify nature-based solutions and a WEAP model that can generate scenarios for water demand, availability, and quality. This evaluation reveals deficiencies in infrastructure, a lack of wastewater treatment, and contamination in ecological flows.

**Keywords:** Water quality, WEAP model, drinking water, SUDS, SbN.

nificativo en el abastecimiento y saneamiento del agua, lo que impacta negativamente en la calidad de vida de sus habitantes.

Las comunidades periurbanas son áreas que se encuentran en los límites de las zonas urbanas, donde se produce una interacción entre lo rural y lo urbano. Estas áreas representan un fenómeno en constante crecimiento y transformación en muchos países, incluyendo México (González-Arellano *et al.*, 2021). A consecuencia de este movimiento, las ciudades tienden a tener movilidad limitada, sistema

de transporte público deficiente y servicios públicos de baja calidad, lo que conlleva a trabajadores y sociedad en general a establecerse en asentamientos informales, y a menudo en zonas periféricas (Banco Mundial, 2017).

Las comunidades del poniente de la ciudad de San Luis Potosí se encuentran en una transición dentro de lo rural y lo urbano, característica principal de las áreas periurbanas, haciendo que la dinámica de población, vivienda, servicios básicos y actividades económicas sean diferentes a las de la zona metropolitana (Guevara y Lara, 2015). La diversidad socioeconómica también es notable en las comunidades periurbanas. Algunas áreas presentan altos índices de pobreza y marginalidad, con población que se dedica principalmente a actividades agrícolas o informales (Castro y Rajadel, 2021), en el caso particular del sitio de estudio, es el tallado de cantera una de las principales actividades económicas. Así mismo, en la zona poniente de la ciudad de San Luis Potosí, en una zona de cerros y laderas, cuya principal vía de acceso es la carretera federal San Luis Potosí-Guadalajara, se asientan las principales comunidades llamadas Escalerillas, Col. Insurgentes, Mesa de Conejos y Pozuelos, las

cuales se han visto involucradas en un crecimiento no planeado, generando problemas de acceso a servicios públicos, que si bien, no todas comparten el mismo escenario, sí presentan como denominador común, la problemática de abastecimiento de agua y de su saneamiento.

Según el informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la rápida urbanización y el crecimiento demográfico en esta zona han generado una presión considerable sobre los recursos hídricos disponible (CONAGUA, 2019). Esto ha resultado en desafíos sobre la disponibilidad, distribución y calidad del agua, y en la falta de infraestructuras adecuadas para el saneamiento. Escalerillas, es una localidad que se encuentra a 5 km al poniente de la zona metropolitana de San Luis Potosí, cuenta con 5,299 habitantes y un total de 1,313 viviendas, éstas albergan un promedio de 4 a 6 habitantes e incluye a la Col. Insurgentes y Mesa de Conejos. Por otra parte, Pozuelos tiene 1,339 habitantes y 357 viviendas, que albergan la misma cantidad de personas promedio por vivienda que Escalerillas (Figura 1).

El sistema de abastecimiento actual empleado por el ayuntamiento de San Luis Potosí incluye

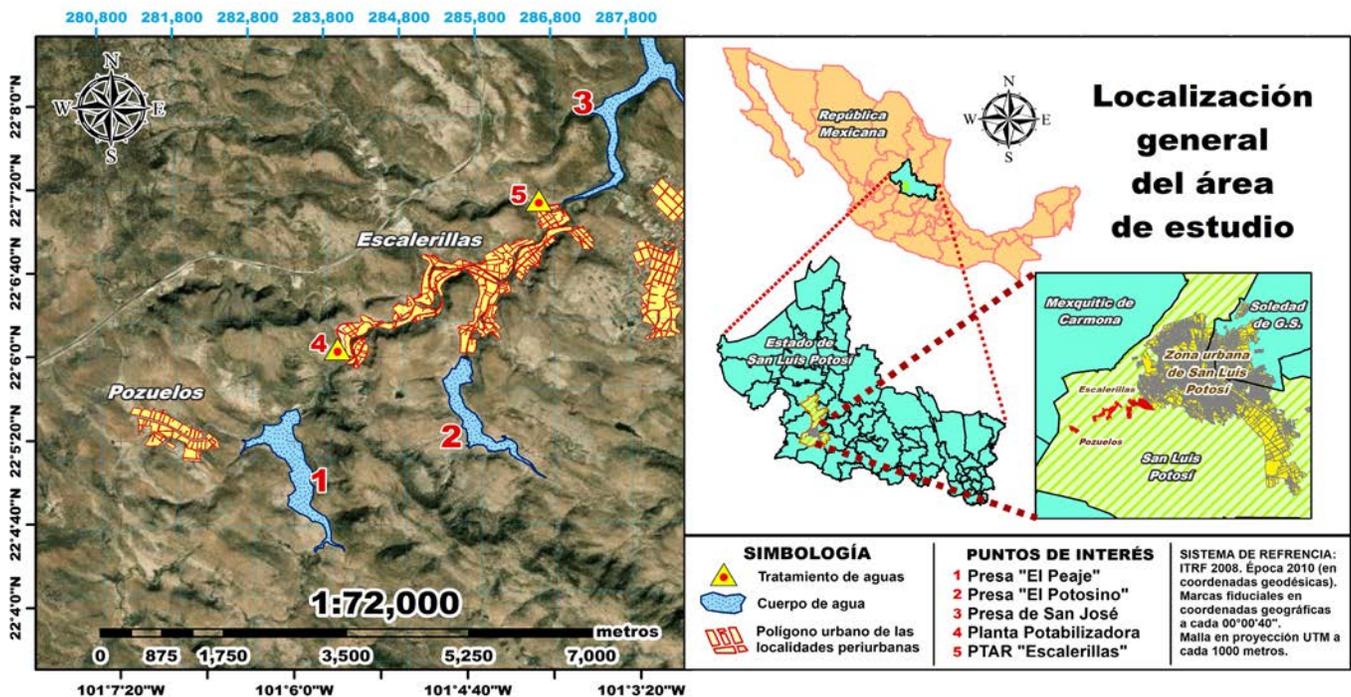


Figura 1. Ubicación de localidades.

el llenado de tinacos de diferentes capacidades, generalmente de 10,000 L, instalados a los lados de la carretera principal San Luis-Guadalajara, en diferentes puntos de las localidades, donde, desde la capital, se envían pipas con una frecuencia estimada según es el censo del ayuntamiento. Una vez efectuado el llenado de los tinacos, los habitantes llegan a tomar el agua de estos tinacos, de manera que, deben aprovecharse para las familias que estarán “beneficiadas” en el área del tinaco instalado. Cabe destacar que no se paga ningún precio por esta acción y lamentablemente no existe ningún proceso que permita regular la cantidad de agua suministrada y aprovechada para cada vivienda. A menos que los beneficiados busquen algún tipo de acuerdo común para que se puedan abastecer, no hay un control de la cantidad de líquido que debe suministrarse (Robledo, 2013). Este sistema se encuentra implementado para ambas comunidades, para Escalerillas y para la localidad de Pozuelos.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Vivienda realizado en el año 2010, la localidad de Escalerillas solo contaba con un 23% de acceso a una red de agua potable dentro del ámbito de vivienda, pero, esta red no está conectada a una red de abastecimiento y en contraste con Pozuelos solo el 1% de las viviendas contaba con acceso a red de agua potable. Mballa y Hernández-Espericueta (2018) encontraron un 25% de acceso a la red de agua potable y para el inventario en 2020 de INEGI un 32% de acceso, y Pozuelos con un 19%. En general, en la actualidad, el problema de la deficiencia de la infraestructura hidráulica sigue existiendo (Mballa y Hernández, 2018).

Para el sistema de saneamiento de agua potable, según una entrevista con el subdirector de CONAGUA en el estado de San Luis Potosí, en 2018 la CONAGUA, con convenio con la CEA del estado de San Luis Potosí y con INTERAPAS, crearon una conexión de tubería desde la Presa El Peaje hasta una planta potabilizadora, pero por problemas de infiltración de la cortina y problemas con la tubería, la infraestructura de potabilización quedó inutilizable. Para la particularidad del sistema de saneamiento de aguas residuales, en ese mismo año se instaló una planta de tratamiento de agua

(PTAR) localizada en Escalerillas, con un caudal de 5 L/s, pero debido a la falta de pago de estas localidades, fue insostenible operar esta PTAR sin recursos por lo que el agua residual cae en crudo al caudal ecológico del Río Santiago, cuyo destino final es la Presa de San José, una de las principales para el abastecimiento de la ciudad de San Luis Potosí.

En cuanto al saneamiento, en 2010 en Escalerillas solo había 62% de acceso a una red de drenaje y en 2020 83% contaban con una red de drenaje, en Pozuelos el acceso al drenaje aumentó de manera considerable porque en 2010 se contaba con 22% de acceso y en 2020 se tiene 46%. Toda esta problemática con la deficiencia de la infraestructura y acceso a servicios públicos generan un alto índice de rezago social (Castañeda *et al.*, 2022), recordando que es ponderada y que resume indicadores de educación, acceso a servicios de salud, calidad y espacios de vivienda, servicios básicos y activos del hogar (**Tabla 1**). Todo esto, con base a los resultados obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI (CONEVAL, 2021).

Al analizar las variables, se determinó que las AGEB (área geoestadística básica) 2751, 2766, 2770, 3321, 3938 y 4870 pertenecientes a Escalerillas, presentan un índice de rezago social y vivienda alto, lo que significa que el acceso a servicios básicos como agua y drenaje, y características básicas de un hogar con excusado o electricidad son escasos (**Figura 2a y 2b**).

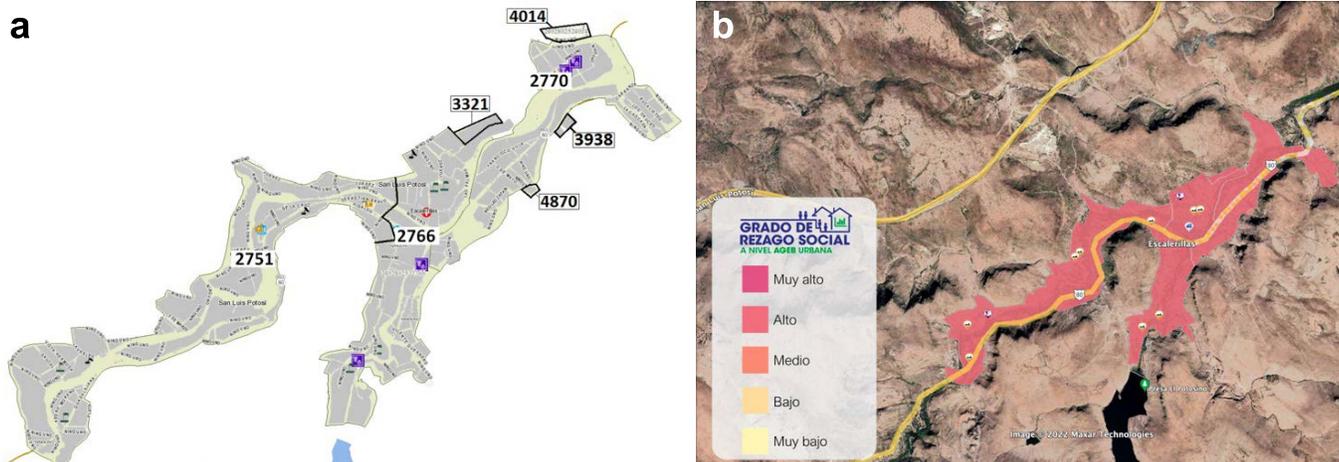
Para el caso de Pozuelos, el CONEVAL no tiene registro acerca de su índice de rezago social, pero de acuerdo con el Inventario Nacional de Vivienda el acceso a los servicios básicos, son bajos o casi nulos, haciendo una gran referencia lo que vive Escalerillas actualmente, de tal manera que, aunque esta no tenga un registro oficial dentro de la información de CONEVAL se puede concluir que tiene un índice muy alto.

El objetivo de este trabajo es evaluar el problema de abastecimiento del agua potable y del sistema de saneamiento en comunidades periurbanas al poniente de la ciudad de San Luis Potosí para proponer soluciones, y se incluyen los siguientes

**Tabla 1.** Indicadores del índice de rezago social (IRS) según dimensión. Fuente: CONEVAL, 2021.

Dimensión	Indicadores de rezago social
Rezago educativo	Población de 15 años o más analfabeta
	Población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela
	Población de 15 años y más con educación básica incompleta
Acceso a los servicios de salud	Población sin derechohabiencia a servicios de salud
Calidad y espacios de la vivienda	Viviendas con piso de tierra
Servicios básicos en la vivienda	Viviendas que no disponen de excusado o sanitario
	Viviendas que no disponen de agua entubada de la red pública
	Viviendas que no disponen de drenaje
	Viviendas que no disponen de energía eléctrica
Bienes del hogar	Viviendas que no disponen de lavadora
	Viviendas que no disponen de refrigerador

Nota: el cálculo de los indicadores de rezago social referentes a las características de la vivienda considera el total de viviendas particulares habitadas con características, que incluye a las viviendas sin información de ocupantes.



**Figura 2.** Localidad de Escalerillas, S.L.P. **a)** AGEBS. **Fuente:** Secretaría de Desarrollo Social y Regional, 2021. **b)** Índice de rezago social. **Fuente:** CONEVAL, 2021.

específicos: 1) generar un diagnóstico de la situación actual del sistema de acceso al agua potable y saneamiento de Escalerillas y Pozuelos mediante análisis espacial y verificación en campo, y 2) determinar la calidad de agua de cauces, embalses y otros cuerpos con parámetros físicos para generar indicadores e índices ecológicos y necesidades de saneamiento.

### Materiales y métodos

Para la planeación de los puntos a muestrear, se hizo un recorrido para identificar las posibles fuentes de

agua residual y de diferentes cuerpos de agua, ya sean embalses y ríos dentro de la zona de estudio, además de apoyarse con la red hidrológica de la cuenca de la presa San José, con una escala 1:75,000 descargada del SIATL (Simulador de Flujos de Agua en Cuencas Hidrológicas) perteneciente al INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Toda la información anterior fue adjuntada mediante archivos tipo shape (.shp) al programa ArcGIS para tener una mejor vista de los puntos de muestreo, y descargas a los caudales ecológicos de la Presa “El Potosino” y del Río Santiago (**Figura 3**).

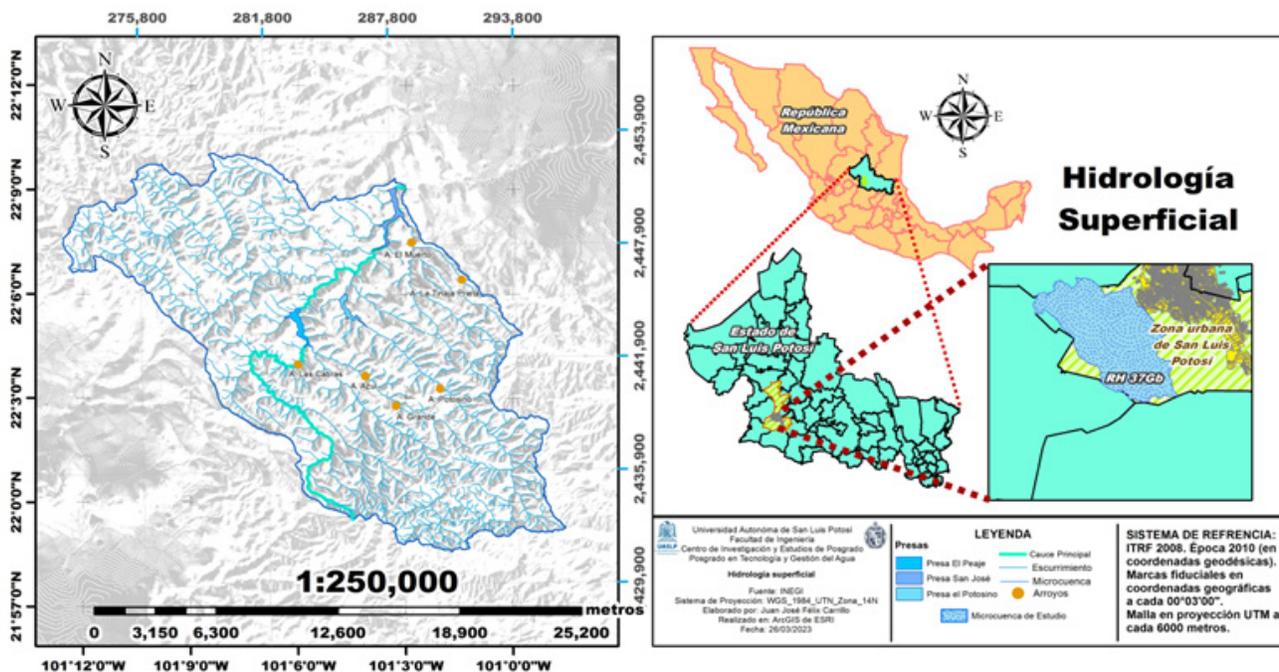


Figura 3. Hidrología superficial de la cuenca de la presa San José.

En campo, se realizó una medición empleando un potenciómetro Hanna® HI 98193 con sonda HI 764073 para oxígeno disuelto (OD) y otro potenciómetro Hanna® HI 98194 con sonda HI 7698194 para la medición de pH, ORP (potencial óxido-reducción), conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS) y temperatura.

Para realizar la recolección de muestras se emplearon tubos Falcon® cónicos con capacidad de 50 mL, que fueron transportadas en una hielera con gels congelantes que permiten la conservación de las muestras, y evitan su degradación, y una vez llegando al laboratorio se preservaron a una temperatura de 4 °C para su análisis. Se evaluaron parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total ( $N_T$ ) y fósforo total ( $P_T$ ) empleando un kit correspondiente a cada parámetro y la metodología de reacción por la empresa Hanna®, también se utilizó un digestor (HI 839800-01) y un fotómetro multiparamétrico (HI 83224) con diferentes métodos de lectura que incluyen los parámetros de interés y este fotómetro posee una fuente de luz de tungsteno con un filtro de interferencias de banda estrecha, básicamente los métodos son con base en colorimetría.

Para las muestras de cuerpos de agua, embalses y ríos se emplearon viales de bajo rango comprendidos: 1) DQO de 0 a 150 mg/L, 2) nitrógeno 0.0 a 25 mg/L y 3) fósforo de 0 a 1.15 mg/L y para las muestras de aguas residuales viales de DQO medio rango que van desde 1) 0 a 1,500 mg/L, 2) nitrógeno 10 a 150 mg/L y 3) fósforo de 0 a 32.6 mg/L. Para la determinación de sólidos suspendidos totales, se necesitaron un total de 19 Crisoles Goch, y 19 filtros con una apertura de 5  $\mu$ m con referencia a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de Agua – Medición de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.

En el caso de la alimentación del modelo WEAP, se empleó la información acerca de la región hidrológica RH37Gb, que considera todas las capas de información disponibles, como lo es la topografía, carta de uso de suelos y vegetación, edafología, estaciones climatológicas cercanas, temperatura, tipo de clima y los AGEB's disponibles en el área, para poder referenciar nuestra área de estudio, pero, sobre todo, caracterizarlo de manera adecuada.

Por último, para la generación de nuestras propuestas de solución de acuerdo con la

caracterización de las cuencas y las condiciones actuales de la infraestructura, se considera la instalación de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) y un humedal de tratamiento, uno nos ayudará en la cuestión del abastecimiento de agua y el otro con el tratamiento de agua residual dentro de la zona para intentar disminuir la cantidad orgánica en el cauce del Río Santiago.

## Resultados

Con la información obtenida del Inventario Nacional de Vivienda del 2020, así como los recorridos empleados de manera puntual en el área de estudio se encontró que los sistemas de abastecimiento dentro del área son insuficientes, el hecho de emplear y/o utilizar tinacos para el abastecimiento de agua en las localidades es insuficiente, de acuerdo

con CONAGUA en su Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento “Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado”, una localidad rural debe al menos contar de 30 L/hab/día (litros de agua por habitante por día). Con este sistema de abastecimiento actual con tinacos de 10,000 L cada uno (**Figura 4a, b**), se abastecen 10 familias de hasta 6 habitantes cada una, por lo que cada familia recibe 1,000 L. Esto sucede con un periodo de frecuencia de 3-5 días o hasta los 15 días mediante pipas (**Figura 4d**), por lo que, el abastecimiento actual de las personas ronda por los 21.5 L/hab/día en el mejor de los casos (CONAGUA, 2019).

Las personas deben captar la máxima cantidad de agua en diferentes recipientes (**Figura 4a**) y muchos de los habitantes no reciben la cantidad de agua



**Figura 4.** Estado de la infraestructura de distribución y captación de agua. **a)** Recipientes de captación de agua para uso. **b)** Tinaco otorgado por gobierno municipal. **c)** Estado actual de planta de tratamiento de agua potable. **d)** Uso de pipas para abastecimiento en la zona.

adecuada, es decir, no se tiene un control de cuánta agua debe tomar cada familia, por lo tanto, algunos no reciben los 1,000 L que se asignan por familia, generando un problema muy fuerte en la sociedad debido a la poca concientización de los demás. Este sistema no permite realizar las actividades del día a día, por lo que muchas personas optan por lavar a las orillas del río o incluso tomar agua del río, sin tomar en consideración si el agua se encuentra de buena calidad o no. Algunos de los pobladores, se abastecen de norias, de acuerdo con Mballa y Hernández (2018), un 15% de población lo hace para consumo humano directo sin conocer el estado actual de las mismas lo que abona un problema bastante fuerte de salud para la comunidad.

Este sistema de abastecimiento fue una solución temporal (**Figura 4a, b**), debido a los problemas de la cortina de Presa El Peaje, ya que no captaba la suficiente agua y se infiltraba, de tal forma que no era posible tomar agua captada y enviarla a la planta potabilizadora instalada en Escalerillas (**Figura 4c**), que desde el 2018 hasta la fecha no ha sido utilizada, de acuerdo con datos del subdirector de la oficina estatal de CONAGUA del estado.

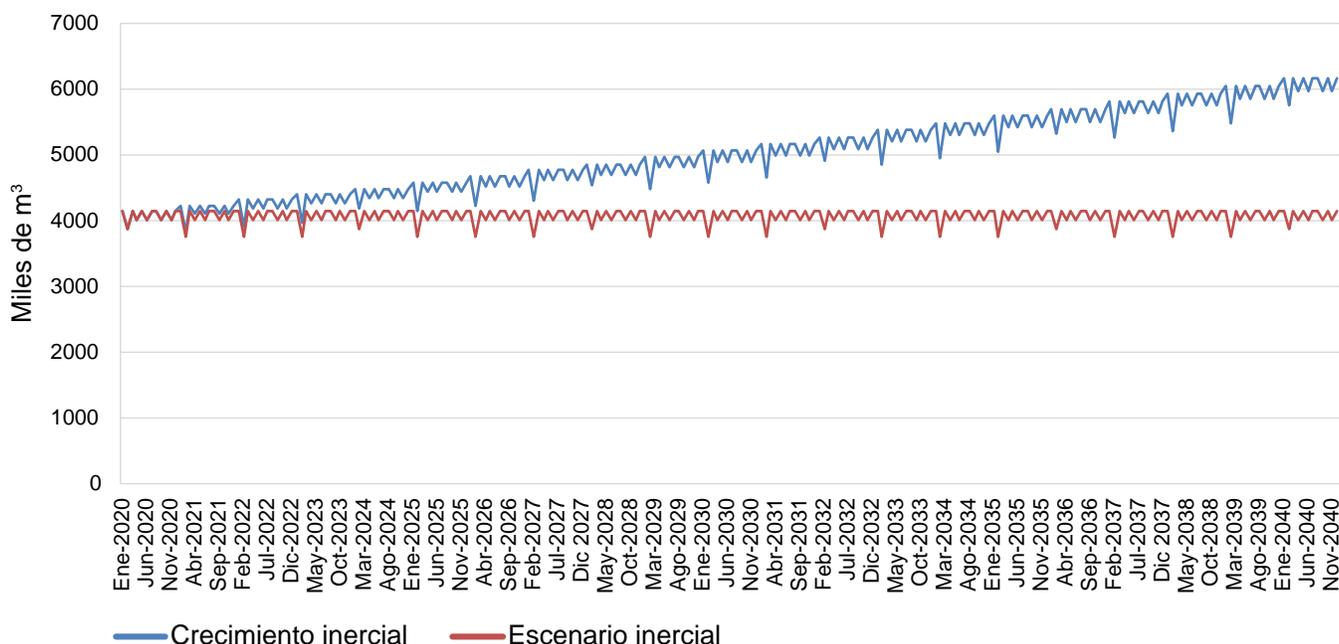
Para entender un poco más la dinámica de distribución, se introducen los resultados de dotación

existentes al software WEAP, para intentar modelar la situación, empleando 2 escenarios, uno donde no existen cambios aparentes y otro considerando el aumento de la población y el cambio climático (**Figura 5**).

Con el paso de los años, el aumento de la demanda de agua es bastante alto, comenzando en el año 2020, donde el consumo era de 4,138.05 m<sup>3</sup> por ambas comunidades. De acuerdo con el aumento anual del 1% de población y del Informe de Cambio Climático por el IPCC, la temperatura media anual del planeta ha incrementado 1.1 °C, haciendo que algunas regiones del mundo experimenten condiciones climatológicas extremas (IPCC, 2023).

Al introducir estos datos de consumo dentro del software WEAP, se desarrollan dos tipos de escenarios, uno de ellos donde no hay cambios significativos, es decir, no existe aumento de población ni cambio climático que afecte a las variables, conocido como escenario inercial, que podemos verificar en la **Figura 5** de color rojo, y el otro escenario, si tenemos variables que afectan el consumo, se incluye aumento de la población y el cambio climático, este escenario lo denominamos crecimiento inercial y se observa en color azul.

De acuerdo con el modelo WEAP, se pronostica



**Figura 5.** Demanda de agua por modelado WEAP 2020 – 2040.

un aumento de la demanda de agua de 4,000 a 5,000 m<sup>3</sup>/año para el año 2040. Si no existe un plan de gobernanza entre las comunidades, el uso de pipas será insostenible, además de que cada día se requerirá más agua para la población y se tendrán que instalar más tinacos alrededor de la carretera. Como se observa en la **Figura 5**, es notorio el cambio de la demanda de agua durante el paso de los años, obligando a replantear todas las decisiones que se tienen hasta ahora y también verificar la conveniencia del sistema de abastecimiento de agua que actualmente se emplea, ya que no tienen ninguna retribución y genera un gasto fuerte en cuestión de mantenimiento y combustible a las pipas del municipio, así como el gasto de rentas de pipas extras cuando las del gobierno no son suficientes. Para el panorama de saneamiento de aguas residuales, las condiciones son iguales o peores, y esto porque la infraestructura que existe actualmente tampoco permite que las aguas residuales sean tratadas.

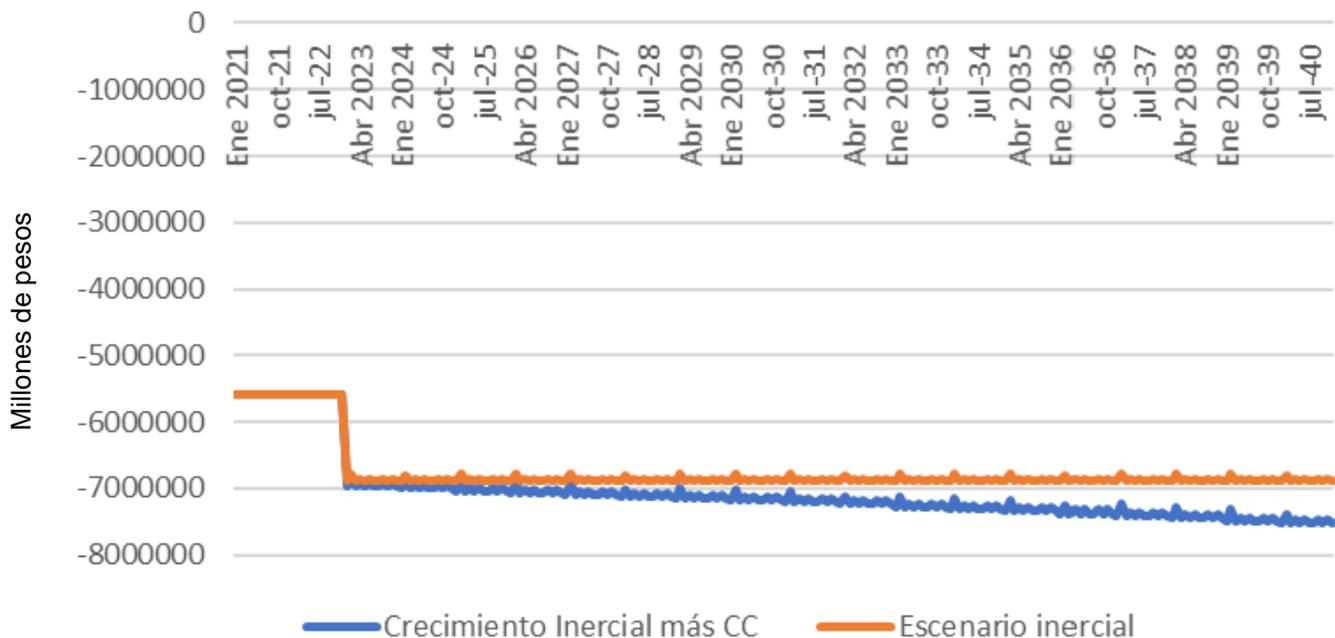
Por su parte, el modelo WEAP también arrojó que una PTAR que funciona sin ningún presupuesto para operar tampoco es rentable. Los costos de operación y mantenimiento de una PTAR como la que se tiene instalada, son altos por los gastos energéticos y por el personal calificado que se

requiere para la operación. Se puede observar en la **Figura 6**, que de continuar el crecimiento poblacional, los gastos se elevarían a más de 7 millones de pesos (actuales), cantidad que tendría que absorber la autoridad.

Los resultados en la **Tabla 2** muestran las posibles fuentes de abastecimiento de agua potable como los puntos dónde se descargan aguas residuales. Mientras que en la **Tabla 3** se muestran resultados de pozos superficiales o norias que se analizaron bajo las mismas condiciones.

Cada uno de los parámetros que se consideran dentro de los análisis de calidad de agua, se encuentran referenciados en la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedades de la nación, NOM-127-SSA1-2021 agua para uso y consumo humano, límites permisibles para calidad de agua. Las barras azules representan todos los valores de las **Tablas 2 y 3**, con sus respectivas medias y puntos más altos y puntos mínimos, incluyendo su desviación estándar. Las **Figuras 7a, 7b, 7c y 7d** evalúan las necesidades de potabilización en la zona de estudio, bajo la NOM-127-SSA1-2021.

Para las **Figuras 8a, 8b, 8c, 8d, 8e y 8f** se



**Figura 6.** Beneficio neto de abastecimiento de agua, el crecimiento inercial representa los cambios en la población y cambio climático mientras que el escenario inercial no considera ninguna de las variables anteriores.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de agua en cuerpos de agua superficiales y aguas residuales.

	pH	ORP mV	CE μS/cm	TDS mg/L	N <sub>T</sub> mg/L	P <sub>T</sub> mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	T °C	OD	
										%	mg/L
Presa “El Potosino” (AAPp)	6.85	378.12	121.00	60.50	2.90	0.15	25.50	159.35	22.91	81.70	7.38
Caudal Ecológico Presa “El Potosino” (CEPp)	8.42	412.05	142.25	71.00	2.70	0.11	25.00	73.35	19.91	123.90	11.56
Efluente PTAR (EPTAR)	7.22	106.07	751.75	375.50	150.00	5.20	285.50	94.00	20.30	0.00	0.00
Combinación Efluente y Caudal E. (CEyPTAR)	7.27	285.80	234.75	117.00	41.00	1.05	33.50	10.00	21.97	41.52	3.798
Efluente A. “El Muerto” (EAM)	7.54	164.95	827.25	413.25	114.00	3.15	138.50	94.00	21.70	3.28	0.28
Efluente A. “La Tinaja Prieta” (EAI)	8.01	271.95	848.00	423.75	66.00	1.70	62.00	90.00	20.04	17.12	1.91
Presa “San José” (PSJ)	6.44	233.55	265.25	132.75	1.80	0.17	40.00	53.35	16.04	21.25	1.97

**Tabla 3.** Resultados del análisis de agua en norias.

	pH	ORP mV	CE μS/cm	TDS mg/L	N <sub>T</sub> mg/L	P <sub>T</sub> mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	T °C	OD	
										%	mg/L
Noria 1	6.06	419.25	206.00	103.25	5.80	0.15	10.00	10.00	22.25	70.52	6.27
Noria 2	8.06	377.16	299.25	151.25	7.95	0.12	23.00	23.35	20.43	118.45	10.74
Noria 3	6.72	172.30	305.00	152.50	7.25	0.29	11.50	30.00	19.82	23.40	2.13
Noria 4	6.25	269.75	223.00	112.00	2.05	0.18	7.00	23.35	17.35	16.10	1.67
Noria 5	7.06	304.90	274.75	137.50	8.95	0.11	4.50	16.65	18.69	71.43	6.70

colocan los límites mínimos y máximos de acuerdo con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 para las necesidades de saneamiento de aguas residuales.

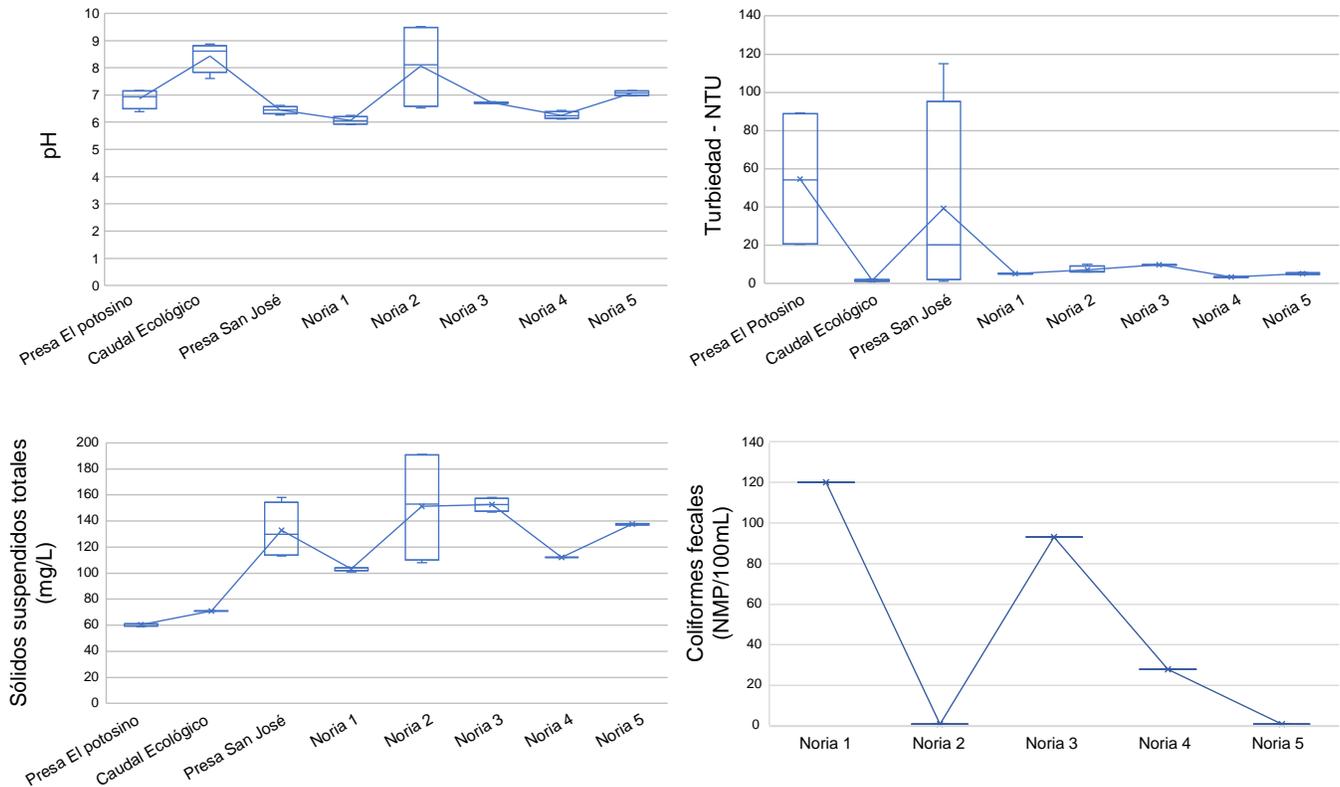
Se observó que, en los parámetros para las necesidades de potabilización, la mayoría de los parámetros analizados se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, en el caso del elemento de los coliformes fecales, se analizó solo en los pozos debido a motivos económicos y por su importancia en el abastecimiento de agua. Los resultados indican que 3 de los 5 pozos analizados tienen presencia de coliformes fecales (**Figura 7d**), por lo que las heces contaminan las aguas residuales dentro de la zona, ya que estos pozos se encuentran al aire libre los animales que se encuentran en el área pueden contribuir a este problema.

## Discusión

Los resultados obtenidos ofrecen un panorama para llegar a las posibles soluciones dentro de nuestra área

de estudio. De acuerdo con el análisis hidrológico, se tienen 400 mm de precipitación anual siendo el periodo más lluvioso de Junio a Septiembre, por lo que es posible instalar sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) en localidades como Escalerillas y Pozuelos, que son 2 de las localidades que presentan el problema del agua.

El gobierno municipal inició un programa “Con Mi Cisterna Sí” que consiste en la entrega de kits de sistemas de captación de agua de lluvia para estas comunidades mediante un estudio socioeconómico en el que de manera aleatoria se pretenden beneficiar a más de 1,000 familias y después ampliarse aún más. El kit contiene un separador de aguas de capacidad de 40 L, una bomba de agua, tubería de diferentes tamaños para llevar a cabo la instalación, y algunas otras herramientas, dentro de lo que destaca un tinaco de 1,000 litros, el cual no es suficiente para capturar una gran cantidad de agua de lluvia y sobre todo que no podría almacenarse



**Figura 7.** Resultados de posibles fuentes de abastecimiento con base a la NOM-127-SSA1-2021. **a)** pH, n=32,  $\alpha=0.05$ , p=0.01, **b)** Turbiedad, n=32,  $\alpha=0.05$ , p=0.024, **c)** Sólidos suspendidos totales, n=32,  $\alpha=0.05$ , p=0.019, **d)** Coliformes fecales, n=5

para un uso futuro y en especial para la época de estiaje en la ciudad.

Empleando una hoja de cálculo elaborada por CONAGUA con respecto al diseño de SCALL y tomando en cuenta la capacidad de agua del tinaco, se obtiene la información de la **Tabla 4**.

Se toma en cuenta un coeficiente de escurrimiento de 0.90 debido al material de construcción de las casas (techo cubierto con material) el cual no facilita la permeabilidad, una dotación propuesta de 35 L/h/día de acuerdo con CONAGUA y 4 habitantes por casa hogar, además de un área de captación de 140 m<sup>2</sup> por el tamaño de las casas de las localidades que suelen ser muy grandes.

Al tener un tanque de almacenamiento con ese tamaño, podemos captar agua durante los meses más lluviosos, pero, este no permitirá en ningún momento poder almacenarla para el futuro, porque todo el volumen excedente estará perdido. Si bien, el sistema es una solución temporal y permanente del área, los cálculos deben emplearse de manera adecuada.

En la **Tabla 4**, podemos observar los resultados en rojo, que es aquella cantidad de agua que quedará en el tanque, al ser valores negativos significa que no habrá suficiente agua que captar, por lo que se sugiere una reconfiguración del sistema en cuanto a la capacidad del tanque de almacenamiento. De acuerdo con el manual técnico de los SCALL, Anaya *et al.* (2018), recomienda el cálculo del volumen de captación de agua de lluvia con los siguientes parámetros:

$$V_{cisterna} = D_j \cdot M_{sequía+2} \quad (1)$$

Dónde  $D_j$ , es la demanda mensual en m<sup>3</sup> por mes y  $M_{sequía+2}$  los meses con menos de 30 mm de precipitación, esto con el fin de garantizar agua todo el año. Si tomamos en cuenta una demanda mensual de 3,600 litros con el mínimo de 35 L/h/día por 30 días, y tomando en cuenta 7 meses con menos de 30 mm de precipitación mensual, tendremos un resultado de un volumen aproximado de 25.2 m<sup>3</sup>,

**Tabla 4.** Diseño SCALL empleando tanque de almacenamiento de 1 m<sup>3</sup> y coeficiente de escurrimiento de 0.90

		Precipitación mensual (mm)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Año	Volúmenes	29	6	8.6	28.1	47.1	65.4	96.2	56.8	81.3	9.6	15.6	2.8	446.50
1	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-0.69	-3.16	-3.26	-0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-2.13	-2.23	-3.99	-0.93
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	4.04	7.78	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	21.27
2	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-4.68	-3.16	-3.26	-0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-2.13	-2.23	-3.99	-1.26
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	4.04	7.78	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	21.27

pero, un tanque de esa capacidad para una familia suele ser un poco más costoso. Intentemos disminuir la capacidad a un tanque de 10 m<sup>3</sup> y volver a correr la simulación del SCALL con el cambio del volumen del tanque.

Con el cambio del volumen del tanque, el volumen de excedente cambia, dando a entender que un tanque de almacenamiento de 1,000 L al menos se ofrece una solución temporal que ayude a solucionar los frecuentes eventos de falta de agua potable, en tanto que un tanque de 10,000 L, permite una mejor captación, además de mantener más agua disponible durante el resto del año (Tabla 5).

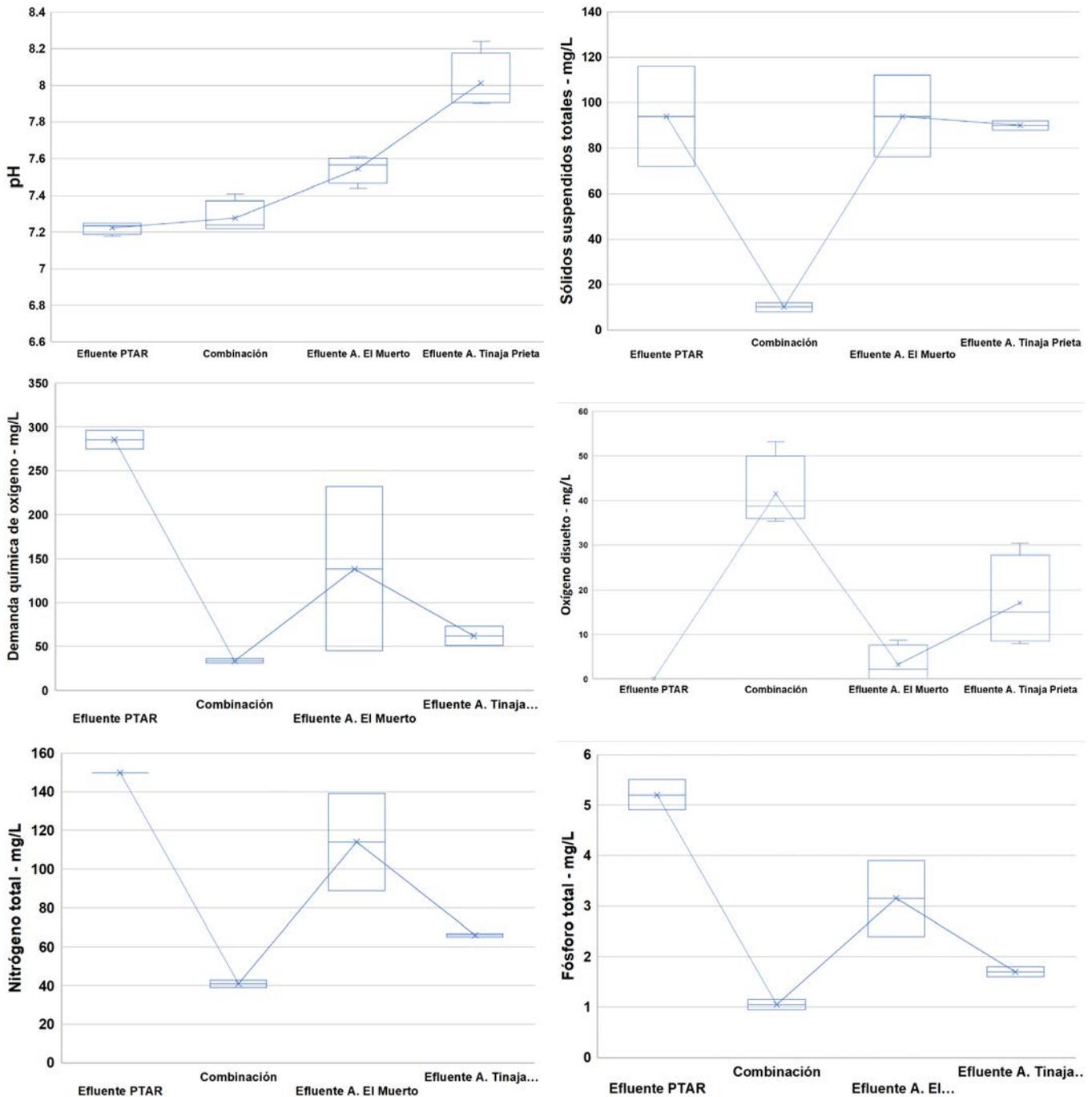
Los sistemas de captación de agua de lluvia

(SCALL) son un componente fundamental dentro de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), ya que ofrecen múltiples beneficios ambientales y sociales que contribuyen a la gestión sostenible del agua en las ciudades, en este caso a la captación de agua de lluvia. Ahora, abordando el tema particular de las aguas residuales, se propone la instalación de un humedal dentro del área dónde se encuentra la descarga de aguas grises dentro del caudal del Río Santiago, el cual, siendo un área completamente natural, permite sobre todo modificaciones de manera más fácil, pero, sin dejar de tomar en cuenta los beneficios de un humedal.

Un humedal es una tecnología de tratamiento

**Tabla 5.** Diseño SCALL empleando un tanque de almacenamiento de 10 m<sup>3</sup> y coeficiente de escurrimiento de 0.90.

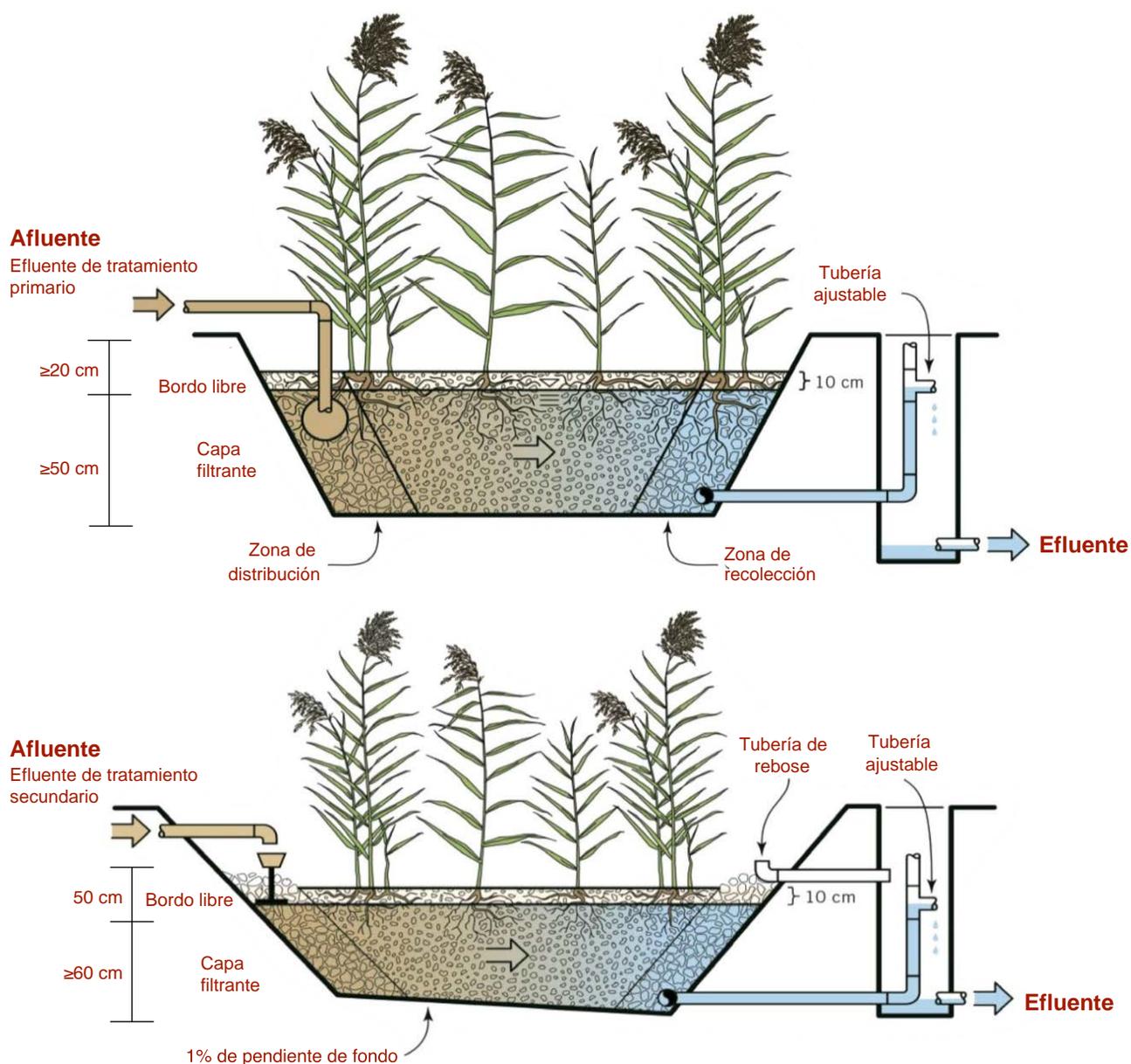
		Precipitación mensual (mm)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Año	Volúmenes	29	6	8.6	28.1	47.1	65.4	96.2	56.8	81.3	9.6	15.6	2.8	446.50
1	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-0.69	-3.16	-3.26	-0.66	1.59	5.63	10.00	10.00	10.00	6.87	4.64	0.65	3.47
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.41	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	12.27
2	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-0.04	-3.16	-3.26	-0.66	1.59	5.63	10.00	10.00	10.00	6.87	4.64	0.65	3.52
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.41	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	12.27



**Figura 8.** Resultados con base a la NOM-001-SEMARNAT-2021 para los puntos con presencia de agua residual a) pH,  $n=32$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.03$ , b) SST,  $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.034$ , c) DQO,  $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.063$ , d) O.D.  $n=16$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.006$ , e)  $N_T$   $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.012$ , f)  $P_T$   $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.007$ .

de agua de manera natural y está potenciado como soluciones basadas en la naturaleza (SbN), que permiten optimizar y ayudar a los procesos naturales ya existentes en el área, por lo que se consideran una opción amigable con el ambiente y una opción sustentable para el tratamiento de aguas residuales (Dotro *et al.*, 2017). Existen varios tipos de humeda-

les, algunos que dependen del tipo de flujo de agua ya sea flujo horizontal superficial, flujo horizontal subsuperficial, flujo vertical subsuperficial, y cada uno de ellos presenta características de acuerdo al tipo de agua residual, pero, con la literatura actualmente revisada (Dotro *et al.* 2017; Vidal y Hormazábal, 2018), se nos permite llegar a la conclusión



**Figura 9.** Esquemas típicos de un humedal de flujo horizontal; parte superior: tratamiento secundario, parte inferior: tratamiento terciario de aguas residuales domésticas. **Fuente:** Dotro *et al.* (2017).

de que un humedal de tipo subsuperficial horizontal es el adecuado para nuestra área de estudio (**Figura 9**), debido a las condiciones de las aguas residuales, permitiendo de manera adecuada eliminar una gran cantidad de materia orgánica de las aguas residuales no tratadas, además de soportar 1.6 gramos de  $DBO_5$  por  $m^2$ , esto debido a que todo el tiempo se encuentra inundado y no hay mayor transferencia de oxígeno, CONAGUA los recomienda debido que no requieren de energía eléctrica (CONAGUA, 2019), haciéndolos viables en comunidades rurales.

Se requiere el uso de plantas macrófitas dentro del mismo humedal, y para esto se proponen las 2 más viables, el carrizo (*Phragmites australis*) y espadañas (*Typha angustifolia*), por ser de rápida propagación, y por su capacidad de tratar efluentes con aguas provenientes de procesos industriales, cloacales y derivaciones domiciliarias (Vidal y Hormazábal, 2018). La espadaña se caracteriza por su resistencia a cambios de pH, tener una altura de hasta 5 metros y la viabilidad de encontrar sus semillas, mientras que el carrizo tolera grandes

cantidades de sal y tiene rápido crecimiento.

Las ventajas de un humedal son estéticamente agradables, permite reducir la cantidad de materia orgánica que se descarga dentro del caudal ecológico del Río Santiago, su construcción es barata y además su tasa de retorno de inversión es más rentable en comparación con la de una PTAR, es por esta razón que un humedal es rentable dentro de nuestro sitio de interés, se prevé que este pueda medir alrededor de 1,125 m<sup>2</sup> y pueda respetar los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Quizá el tamaño pueda parecer demasiado grande, pero, este diseño considera un pre-tratamiento en el cual solo se retiren materia orgánica que pueda tapar la tubería, para poder bajar el área de este humedal, se debe considerar un tratamiento primario.

El esquema presentado de la **Figura 9**, permite notar diferentes configuraciones para los sistemas de distribución del humedal horizontal de flujo subsuperficial, que permitan aprovechar al máximo las plantas macrófitas y generar el tratamiento de agua residual de manera más eficiente, maximizando así la conductividad hidráulica.

## Conclusiones

Se localizaron tres presas para la captación de agua, un pozo profundo, cinco pozos superficiales (norias), una potabilizadora y dos plantas de tratamiento de agua residual, por lo que existe infraestructura suficiente para solucionar los problemas de abastecimiento y saneamiento. El uso de tinacos y pipas para la población de Escalerillas y Pozuelos para el suministro de agua potable, evidencia que no existe una red de abastecimiento funcionando adecuadamente. La rehabilitación de La Presa El Peaje y la Planta Potabilizadora en la Maroma permitirá tener abastecimiento de agua potable para la localidad de Escalerillas. Aunque existe un pozo profundo llamado “Las Cabras” este se encuentra alejado de la comunidad, no hay acceso a la electricidad y no cuenta con una red de distribución de agua. El índice de la calidad del agua de las fuentes potenciales de abastecimiento (presas y norias) presentan valores de calidad de media a buena, y requieren de potabilización, ya que los valores de pH, turbidez y coliformes fecales

se encuentran fuera de rango de la normatividad. El cauce de algunos cuerpos de agua, presentan una mala calidad de agua, y existen valores altos de contaminación (CE, DQO, SST, TDS, N<sub>T</sub>, P<sub>T</sub>), por lo que se asume que existen descargas de aguas residuales aguas arriba de la Presa San José, el Arroyo la Tinaja Prieta y el Arroyo El Muerto. El funcionamiento adecuado de las PTAR permitirá disminuir la carga de contaminantes hacia los cuerpos receptores.

Los escenarios de demanda y disponibilidad de agua muestran un crecimiento de la población de un promedio anual de 1%. Por lo tanto, se obtiene un aumento en la demanda de agua de 4000 a 5000 m<sup>3</sup>/año para el año 2040 y un aumento en la generación de aguas residuales. Pozuelos es la localidad más alejada de la infraestructura disponible para abastecimiento de agua. De acuerdo con las simulaciones y la cantidad de precipitación media mensual encontrada, la instalación de sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) permitirá aumentar la disponibilidad de agua por hogar, aumentando la dotación por día y mejorando el desarrollo de la calidad de vida de los residentes. La operación de la PTAR que forma parte de la infraestructura detectada tiene un alto costo de operación y mantenimiento. De acuerdo con los parámetros de diseño y las simulaciones de DBO<sub>5</sub>, OD y SST, la implementación de un humedal es una solución viable, de bajo costo y mínimo mantenimiento, para el tratamiento de aguas residuales en la zona de Escalerillas y Pozuelos, aprovechando el terreno y las conexiones existentes de tubería. No existe acceso al abastecimiento por agua entubada ni saneamiento de agua dentro de la zona de estudio, por lo que se tiene que recurrir al abastecimiento por pipas, excepto mesa de conejos y Col. Insurgentes. Sí existe la infraestructura hidráulica ya instalada, aunque no operante, para solucionar los problemas de abastecimiento y saneamiento.

## Referencias

Anaya GM, Pérez HA, López HNA, Martínez PIR (2018). *Sistemas de Captación del Agua de Lluvia*. Ciudad de México: Colegio de Postgraduados.

- Banco Mundial (2017). *Informe sobre el desarrollo mundial 2017: La gobernanza y las leyes*, Washington: Banco Mundial.
- Castañeda OJD, Jiménez VTZ y Ramírez RR (2022). Índice de percepción local de mejora del combate al rezago social: análisis de las centrales eólicas en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. *LiminaR. Estudios sociales y humanísticos*, XX(1), pp. 1-18.
- Castro PNA y Rajadel AON (2021). Otra cara de la problemática del agua y el cambio climático; dos realidades sinérgicas yuxtapuestas. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(4), pp. 351-360.
- Castro SLO (2014). Urbanización periférica y agricultura periurbana: Localización espacial y caracterización de los sistemas agropecuarios del municipio de Tarímbaro, Michoacán, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019). *Estadísticas del Agua*, México: CONAGUA.
- CONAGUA (2019). Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. En: CONAGUA, ed. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, p. 92.
- CONAGUA (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. En: CONAGUA, ed. *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales*. Ciudad de México: CONAGUA, p. 119.
- CONEVAL (2021). *Índice de Rezago Social 2020*, Ciudad de México: CONEVAL.
- Anaya GM, Pérez HA, López HNA y Martínez PIR (2018). *Sistemas de Captación del Agua de Lluvia*. Ciudad de México: Colegio de Postgraduados.
- Banco Mundial (2017). *Informe sobre el desarrollo mundial 2017: La gobernanza y las leyes*, Washington: Banco Mundial.
- Dotro G y otros (2017). *Humedales para Tratamiento*. 1a edición ed. Londres: Red panamericana de sistemas de humedales.
- González-Arellano S, Larralde-Corona AH y Cruz-Bello GM (2021). El periurbano en México: identificación y caracterización sociodemográfica y territorial. *Papeles de Población*, 27(108), pp. 129-145.
- Guevara SA y Lara PJA (2015). Agua, pobreza y uso del tiempo en México: Análisis cuantitativo como sustento del diseño de una política pública de doble dividendo. *Nova Scientia*, 7(15), pp. 462-481.
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva: Core Writing Team H Lee and J. Romero.
- Mballa LV y Hernández EF (2018). Las políticas públicas de abastecimiento de agua potable y saneamiento para la localidad de Escalerillas, San Luis Potosí – México: escenarios y percepción ciudadana. *Agua y Territorio*, Junio, I(11), pp. 137-152.
- ONU-Habitat (2018). *Índice básico de las ciudades prósperas*, Ciudad de México: ONU-Habitat.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2022). *Centro de Prensa*. [En línea] Available at: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Robledo CJR (2013). El acceso al agua de uso doméstico en las áreas periurbanas del municipio de San Luis Potosí: El caso de Escalerillas. San Luis Potosí(San Luis Potosí): El Colegio de San Luis AC.
- Secretaría de Desarrollo Social y Regional (2021). *Mapeo de las Zonas de Atención Prioritaria 2021*, San Luis Potosí: Secretaría de Desarrollo Social y Regional.
- SEMARNAT (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- SSA (2022). NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Vidal G y Hormazábal S (2018). *Humedales construidos*. 1a edición ed. Concepción: Universidad de Concepción.



# Estudio hipotético de la rotura de la cortina de la presa Yosocuta, Oaxaca

## Hypothetical study of the rupture of the curtain of the Yosocuta dam, Oaxaca

Oscar Jesús Llaguno Guilberto<sup>1\*</sup>, Jairo Valente Gutiérrez Sosa<sup>2</sup>, Juan Manuel Figueroa Mendiola<sup>1</sup>, Jomaelah Morales Rayo<sup>1</sup>, Juan Maldonado Silvestre<sup>1</sup>, José Manuel Rodríguez Varela<sup>1</sup>, Eduardo López López<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnahuac no. 8532, C.P. 62550, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Tehuacán, Libramiento Tecnológico S/N-A.P. 247, Santa María Coapan, Sta María Coapan, 75770 Tehuacán, Puebla

### Historial

Manuscrito recibido: 7 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de agosto de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Oscar Jesús Llaguno Guilberto

e-mail: oscar\_llaguno@tlaloc.imta.mx.

ORCID: 0000-0002-9239-8081

### Resumen

La presa Yosocuta se encuentra en la región Mixteca de Oaxaca, fue construida para fines agrícolas y para controlar el caudal del río Mixteco para regar y extraer agua para consumo humano a los municipios cercanos. El presente estudio se centra en realizar una rotura a la cortina de la presa con el objetivo de conocer la magnitud del evento hacia aguas abajo, mediante la metodología para la rotura de presas de Blade (2014) y adaptada por Nava *et al.* (2019). Se realiza la construcción del modelo de simulación hidráulico de escurrimientos superficiales, resultando que se vierten al río 26.06 hm<sup>3</sup> con una descarga pico de 3835 m<sup>3</sup>/s y se presentan problemas de inundaciones en las comunidades de San Marcos Arteaga, Natividad, Santo Domingo Tonalá y Yetla de Juárez.

**Palabras clave:** simulación 2d, inundación, presa, rotura, Iber

### Introducción

El presente estudio tiene como finalidad determinar los daños probables generados ante la hipotética rotura de la cortina de la presa Yosocuta ubicada en el municipio de Huajuapán de León, Oaxaca, sobre el río Mixteco (**Figura 1**). Para este análisis se requiere crear un modelo hidráulico de simulación bidimensional preciso, mediante recopilación de información, que permita representar las consecuencias hacia las comunidades aguas abajo del reservorio.

La presa Yosocuta fue construida entre los años 1934 a 1940, e inaugurada el 30 de noviembre de

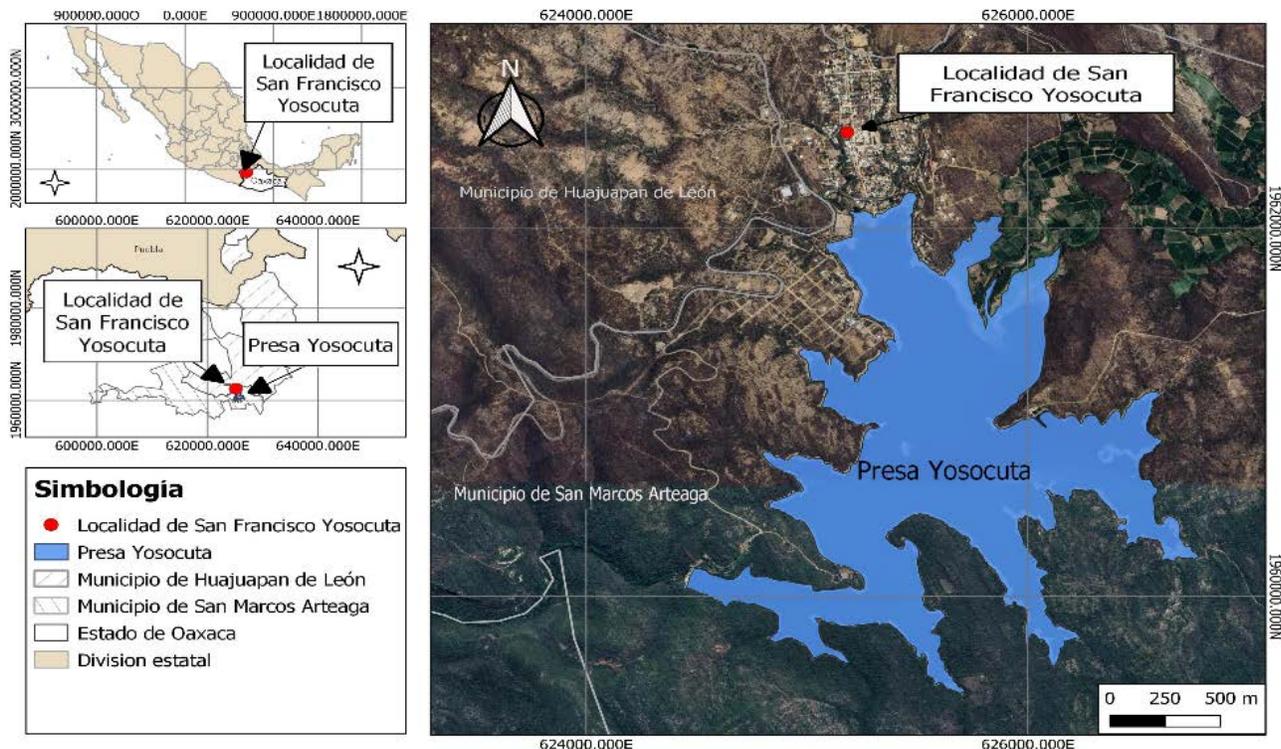
### Abstract

The Yosocuta dam is located in the Mixteca region of Oaxaca, it was built for agricultural purposes and to control the flow of the Mixteco river to irrigate and extract water for human consumption to nearby municipalities. The present study focuses on breaking the dam curtain with the objective of knowing the magnitude of the event downstream, using the methodology of Blade (2014) and adapted by Nava *et al.* (2019). The construction of the hydraulic model simulation of surface runoff is carried out, resulting in around 26.06 hm<sup>3</sup> being discharged into the river with a peak discharge of 3835 m<sup>3</sup>/s and flooding problems in the communities of San Marcos Arteaga, Natividad, Santo Domingo Tonalá and Yetla de Juárez.

**Keywords:** 2d simulation, Inundation, dam, break, Iber

1970. La vida útil prevista para este proyecto fue de 25 años, la cual depende del volumen de azolve dentro del embalse que reduce el almacenamiento y perjudica el desempeño (Acosta, 2021). En el periodo de 1987-1992, se realizó la construcción del sistema de extracción y purificación para abastecer a los municipios de Huajuapán de León, Santo Domingo Tonalá, San Marcos Arteaga, San Jorge Nuchita, y San Agustín Atenango (Toledo *et al.*, 2008).

De acuerdo al informe realizado por la comisión integrada por Toledo y otros (2008) dirigido a la Comisión Nacional de Agua (Conagua) con el



**Figura 1.** Ubicación de la Presa Yosocuta.

objetivo de solicitar apoyo para el mantenimiento de la presa, se encontraron las siguientes problemáticas: 1) Contaminación producida por el vertimiento de aguas residuales proveniente de las poblaciones aguas arriba. 2) Pérdida de volumen de agua por el uso del sistema de riego por gravedad empleado para los cultivos, que termina siendo vertida en las barrancas. 3) La deforestación provoca que las lluvias arrastren el suelo de la cuenca del Río Mixteco, causando un alto nivel de azolve, alcanzando un 38% en el año 2008.

El 1 de abril del 2016, según Conagua en la cortina de la presa Yosocuta se observan filtraciones de agua en forma de manchas de humedad entre la conexión del terreno natural y la cortina de la presa (SRI, 2016). Dadas estas consideraciones, el propósito de este trabajo es notificar de los riesgos a los que se exponen los habitantes aguas abajo de la presa, que se encuentran en una zona potencialmente peligrosa, dando a conocer los resultados que muestren el panorama de lo que ocurriría en caso de una rotura de la cortina. Conocer el tiempo disponible para tomar medidas de seguridad, así como tener rutas de evacuación, identificar las zonas

más altas y estar preparado para evacuar en caso de que esta situación se presente en la realidad, así como comprender el alcance de dicho evento, son aspectos cruciales para prevenir pérdidas humanas y calcular el impacto del agua en las poblaciones afectadas. Además, un evento de este tipo podría ocasionar la pérdida o daño de los bienes materiales de los pobladores, una interrupción de los servicios y daños físicos de los cultivos, imposibilitando la recolección de las cosechas, afectando el autoconsumo y la venta de los productos con las consecuentes pérdidas económicas.

Para la construcción del modelo hidráulico se utilizará el programa de uso libre Iber y la metodología empleada por Nava *et al.* (2019), donde se explican los pasos a realizar para la construcción del modelo hidráulico que permita la rotura de la cortina de la presa.

## Materiales y métodos

### Caracterización de la zona de estudio

Según la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012)

que cuenta con un inventario de presas, con datos obtenidos del diseño, información documental y visitas de campo se presenta a continuación las características generales de la presa. La **Tabla 1** muestra la cuenca y el escurrimiento que se presenta en la zona de estudio.

La presa Yosocutá tiene una cortina rígida de tipo gravedad con material de mampostería y una cimentación a base de roca (**Tabla 2**).

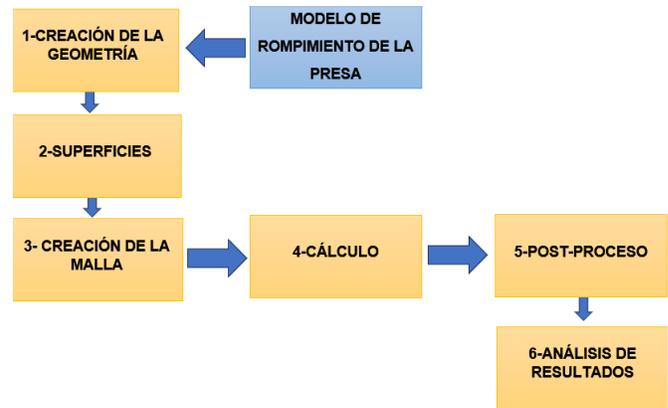
**Modelo hidráulico**

El programa Iber fue desarrollado por la Administración Pública Española junto con varias universidades españolas, su interfaz está basada en GiD el software de Preproceso y Postproceso, fue desarrollado por el International Center For Numerical Methods In Engineering CIMNE. Iber surge debido a la necesidad de innovación del Centro de Estudios Hidrográficos de tener un modelo que haga más fácil la tarea de aplicar la legislación sectorial vigente en materia de agua, especialmente en los requerimientos derivados de la Directiva Marco del Agua, la Instrucción de Planificación Hidrológica, la Directiva de Inundaciones o el Plan Nacional de Calidad de las Aguas (Bladé *et al.*, 2014). La metodología, descrita en la **Figura 2**, se basó en lo descrito por Bladé *et al.* (2014) con modificaciones realizadas por Nava *et al.* (2019).

**Paso 1. Geometría.** La geometría se realizó a partir de cubrir la zona de la presa Yosocutá y 150 km hacia aguas abajo del río Mixteco con un ancho promedio de 2500 metros en cada margen (**Figura 3**). El dominio además contempla las poblaciones de San Marcos Arteaga, Santo Domingo Tonalá, San Jorge Nuchita, y San Agustín Atenango.

**Tabla 1.** Cuenca y escurrimiento de la presa Yosocutá (CONAGUA, 2012).

Región hidrológica	Balsas
Cuenca	Río Mixteco
Área	911.90 km <sup>2</sup>
Corriente	Río Huajuapán
Afluente de	Río Salado



**Figura 2.** Pasos para la rotura de presas.

**Paso 2. Superficies.** Las superficies creadas fueron 47 para cubrir las zonas inundables, cauce del río y vaso de la presa (**Figura 3**). Esta información contribuye a desagregar el tamaño de malla para reducir el tamaño en las zonas de interés y caso contrario en las zonas inundables aumentarlo.

Posteriormente, se le agregaron las condiciones de contorno e iniciales para que se pueda dar el evento de la rotura de la presa. Dicho paso consiste en asignarle el valor de la altura de la corona, una altura de 1509.7 msnm (**Figura 4**), en esta ocasión se decidió ese valor dado que se encuentra el vertedor a partir de esa elevación y de aumentarse el nivel del agua desde el inicio de la simulación entraría en funcionamiento la obra de desfogue.

La condición de salida selecciona el modo

**Tabla 2.** Características de la cortina de la presa Yosocutá (CONAGUA, 2012).

Tamaño	Grande > 15m
Comportamiento	Rígida
Tipo	De gravedad
Material	Mampostería
Tipo de cimentación	Roca
Altura máxima	53.70 m
Elevación de la corona	1513.70 m. s. n. m.
Longitud	105 m
Ancho	3 m
Volumen del cuerpo	81630 m <sup>3</sup>
Altura sobre el cauce	53.70 m

supercrítico en las fronteras de la margen izquierda del río y de la frontera noroeste, dada la velocidad de la rotura es predecible que se tenga este comportamiento del flujo (**Figura 5**).

**Paso 3. Malla.** Para la generación de la malla, previamente se agrega la información de la rugosidad del terreno e infiltración. Para la rugosidad se tomaron los valores presentados por Chow (1994), de acuerdo con la **Tabla 3**, comparando las características de los distintos usos de suelo y vegetación.

Posteriormente, en el programa se realizó la asignación automática para que cada detalle de rugosidad quedará con la precisión adecuada. Para el análisis de pérdidas por infiltración se utiliza el método SCS, que utiliza el método del número de curva para estimar la infiltración. El proceso se realiza con el detalle del Soil Conservation Service (SCS, 1972) y requiere información del uso de suelo y edafología obtenido del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, Temas, mapas temáticos de México, 2023), con esta información más tablas se obtiene un *shape file* del número de curva.

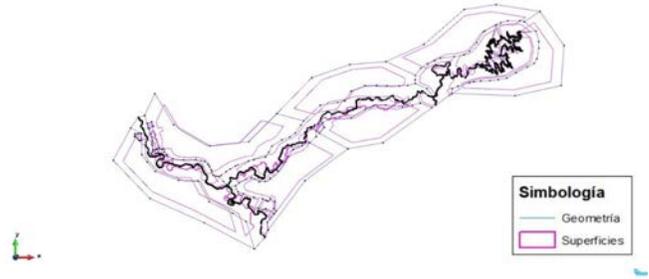
El proceso continuó en asignar automáticamente las pérdidas por infiltración mediante el método del SCS, se presenta en la **Figura 6**.

El tamaño de malla se estima considerando resoluciones menores para zonas de importancia y mayores para las zonas inundables, a continuación, en la **Figura 7a** se presenta el tamaño de malla y en la **Figura 7b** la malla resultante.

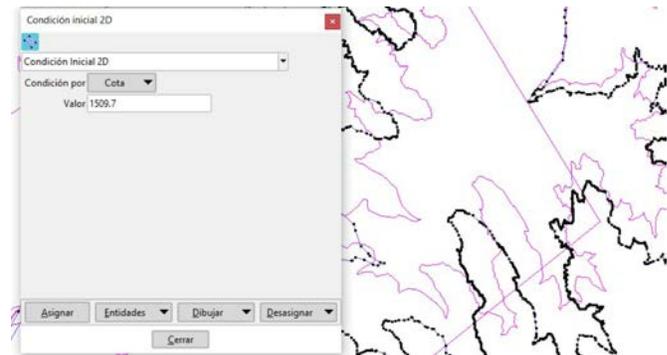
Para darle la información de la elevación del terreno, primamente, se obtuvo la batimetría del Organismo de Cuenca Balsas (OCB, 2012) con curvas

**Tabla 3.** Coeficientes de valores de rugosidad (Chow, 1994).

Tipo	Manning
Asentamientos humanos	0.017
Bosque de coníferas	0.04
Vegetación inducida	0.03
Agricultura anual	0.04
Cuerpo de agua	0.045



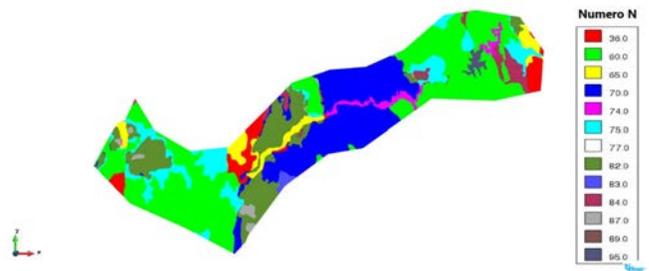
**Figura 3.** Superficies del proyecto generado en el programado Iber.



**Figura 4.** Condición inicial del modelo, generado en el programado Iber.



**Figura 5.** Condiciones de salida, generado en el programado Iber.



**Figura 6.** Número de curva para el método del SCS, generado en el programado Iber.

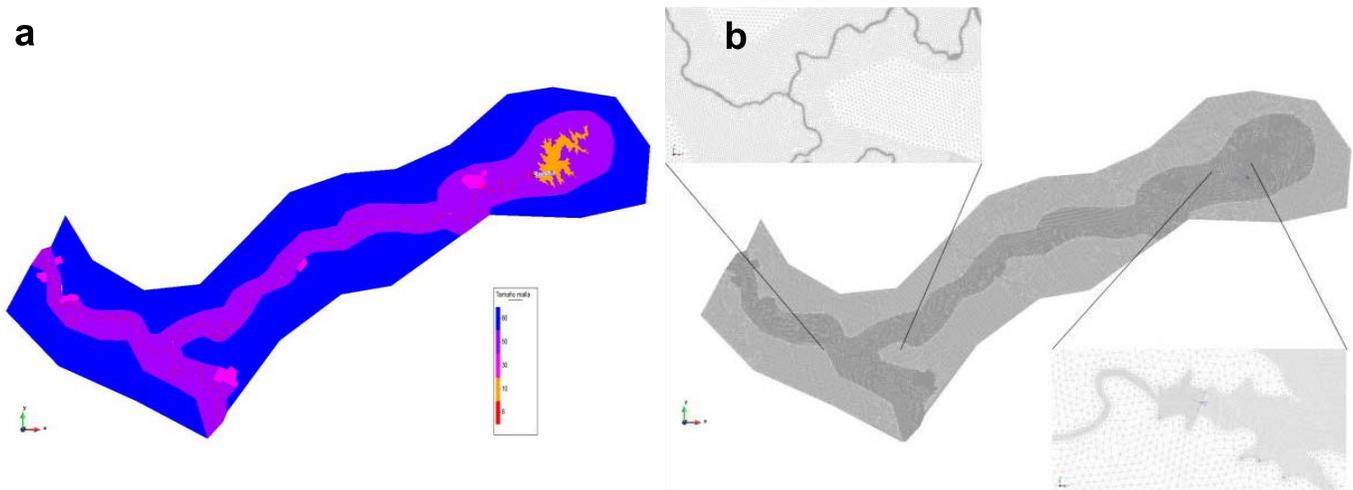


Figura 7. Tamaños de malla del modelo. a) Tamaño de malla. b) Malla resultante.

de nivel a cada medio metro (Figura 8a), para el río no se tiene registro de alguna fuente de información de batimetría, por lo que se recurrió a conocer una sección promedio de acuerdo al plan municipal de desarrollo de San Nicolás, Hidalgo y Silacayoapan (2011) de donde se le asigna una altura de 3 metros, pero se conserva el ancho de la sección. El resto de la configuración del terreno se genera a partir de la información del continuo de elevaciones de México del INEGI (2023) con datos de terreno en pixeles de 15 x 15 metros (Figura 8b). El resultado del terreno se presenta en la Figura 9.

Para la brecha, que es la ventana que contiene la información de los parámetros a alimentar, primeramente, se establece un tiempo de rotura de 10 minutos de acuerdo con el ministerio del medio ambiente de España (MMA, 2021), el método para la

rotura es con la guía técnica española, con respecto a la cota superior e inferior se agregó 1509.7 y 1480 msnm, respectivamente, y el volumen del embalse se obtiene a partir de la información del OCB (2012).

**Paso 4 cálculo.** Para la simulación se le agregó un tiempo de 120,000 segundos con intervalos de resultados a cada 600 segundos, estos valores dieron estabilidad al modelo dado que configuraciones previas del modelo en el tamaño de malla e intervalo de tiempo generaban problemas en la convergencia para la consecución de los pasos de tiempo, por lo tanto, se le asignó un valor al número de courant de 0.45. Por otra parte, el tiempo computacional para la obtención de resultados fue 54 horas.

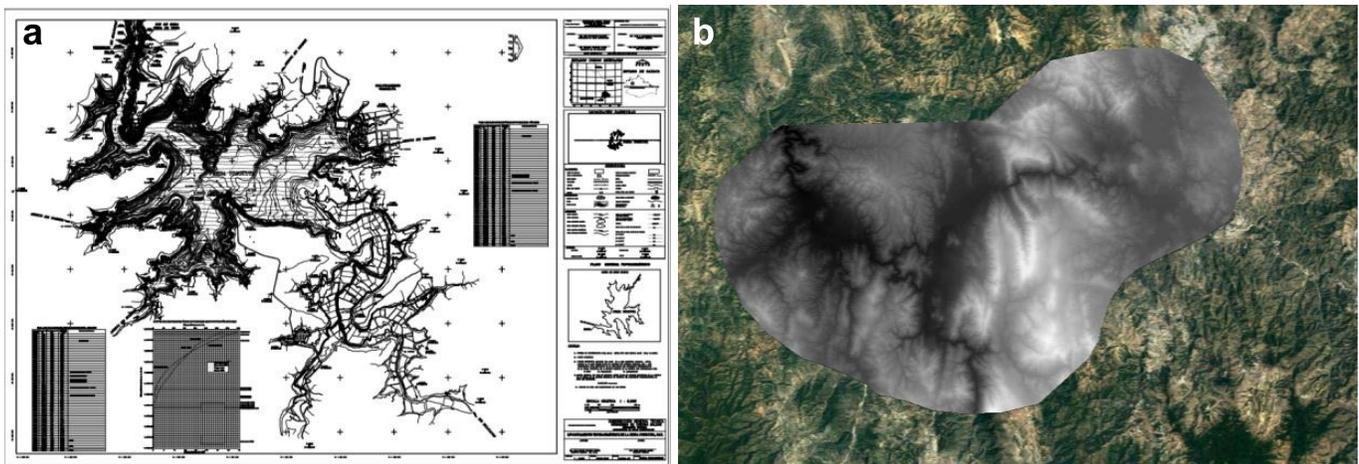
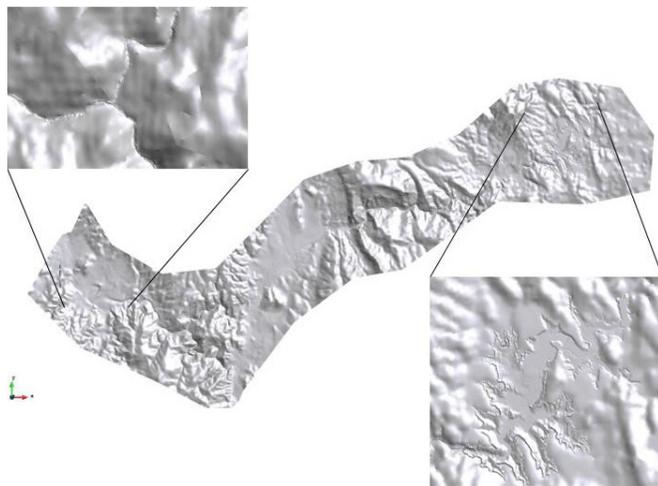


Figura 8. a) Plano de estudio topobatemétrico de la presa Yosocuta y b) continuo de elevaciones mexicano en la zona de estudio.



**Figura 9.** Terreno utilizado en el modelo hidráulico.

**Pasos 5 y 6. Postproceso y análisis de resultados.** Estos pasos se detallan en la siguiente sección.

**Resultados**

Los resultados presentados a partir de la rotura de la presa se presentan a continuación: El volumen descargado hacia el río es de 26.06 hm<sup>3</sup> y de acuerdo a la curva-elevaciones capacidades proporcionada por el OCB (2012) menciona para la cota 1509.7 msnm un volumen de 27.29 hm<sup>3</sup>/s, es decir se descarga el 95.4% del volumen de la presa. Con respecto al hidrograma presentado en la descarga de la presa se tiene un gasto máximo de 3.835.17 m<sup>3</sup>/s (**Figura 10**).

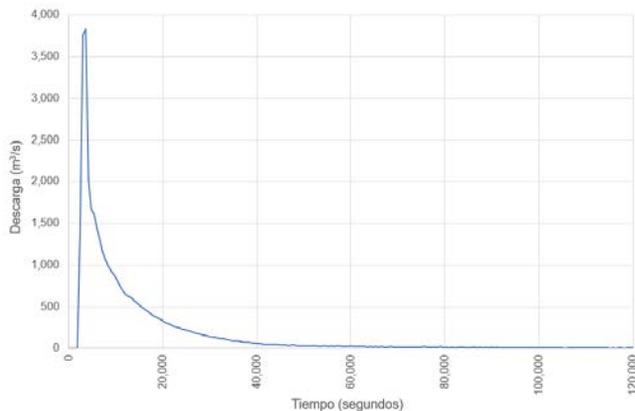
**Análisis de poblaciones**

A continuación, se describen las incidencias en las poblaciones aguas abajo de la presa.

**San Marcos Arteaga**

El municipio se ubica a 6 km aguas abajo de la presa Yosocuta, con áreas de afectación de 40.01 ha en la parte urbana y 46.40 ha respecto a los cultivos. El municipio cuenta con 1,115 habitantes según datos recabados por INEGI (2020), el nivel del agua alcanza hasta 8 calles de la población y 291 viviendas particulares, con base en los censos de población y vivienda, considerando el promedio de ocupantes por vivienda de 3.6 realizados por INEGI (2020), se afectaría a 1047 personas.

Las corrientes de agua que se mueven por las



**Figura 10.** Hidrograma de la descarga de la presa por la rotura.

calles suponen un peligro para la seguridad de las personas y los vehículos, teniendo en cuenta los criterios basados en la consideración conjunta de los calados y velocidades del flujo, bajo de peligrosidad utilizado por Témez (1992), para velocidades de 0.5 a 1 m/s y de calado mayores a 1 m, ya se considera una zona de inundación peligrosa. La **Tabla 4** muestra los detalles en distintas ubicaciones en el municipio de San Marcos Arteaga, las calles tienen una longitud total de 7.48 km, y se muestra el tirante, velocidades, y caudales máximos.

Debido a las velocidades y tirantes máximos, la zona alcanzada por el agua es de peligro alto y se debe tener medidas de seguridad, después de

**Tabla 4.** Tirantes, velocidades y caudales máximos en San Marcos Arteaga.

Ubicaciones	Tirante máximo	Velocidad máxima	Caudales máximos
	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)
Calle Iturbide	23.24	9.36	37.67
Calle Guerrero	21.74	8.65	50.69
Calle Mina	23.96	5.17	52.83
Calle Insurgentes	20.08	3.57	41.07
Calle Reforma	15.43	2.86	26.52
Calle Hidalgo	10.82	3.12	13.76
Calle Allende	8.07	1.04	4.48
Parque de San Marcos Arteaga	15.05	2.87	24.79

la rotura de la cortina de la presa, se tendrán 50 minutos para tomar medidas de evacuación de la zona urbana del municipio de San Marcos Arteaga. En la **Figura 11**, se visualiza el área de la población que es afectada.

**Población de Natividad**

En la población de Natividad ubicada a 21.38 km de la presa Yosocuta y que pertenece al municipio de Santo Domingo Tonalá, el flujo del agua alcanzaría a 12 viviendas particulares y 43 habitantes, el área urbana de la población de natividad es de 1.93 ha, las calles alcanzadas tienen una distancia total de 0.28 km, los detalles se muestran en la **Tabla 5**.

En algunas partes, el tirante alcanzaría un metro que entra dentro de los parámetros de zona peligrosa, sin embargo, la velocidad no rebasaría 1 m/s, se determina que es una zona de inundación baja, la siguiente imagen muestra el área afectada de la población de natividad, con el agua llegando a esta población a las 3 horas con 50 minutos después de la rotura, como se muestra en la **Figura 12**.

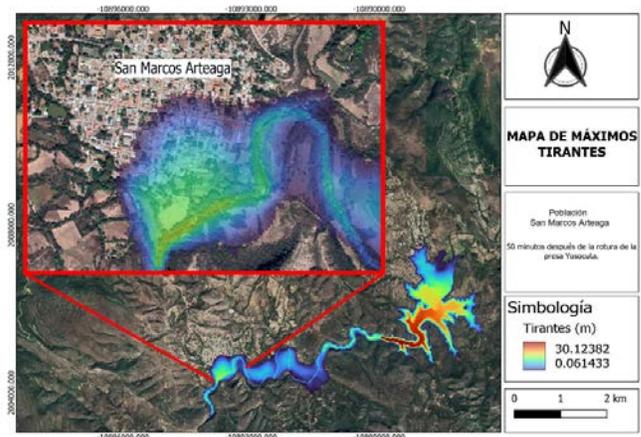
**Santo Domingo Tonalá**

En el municipio de Santo Domingo Tonalá, ubicado a 21.761 km de la presa Yosocuta, la planta tratadora de aguas residuales sería alcanzada por el nivel de agua, así como 6 viviendas y 21 habitantes, el área urbana sería de 0.946 ha y la longitud total de calle sería de 0.15 km, existe una mayor afectación para el área de cultivos, ya que esta equivale a 48.667 ha, la **Tabla 6** muestra los detalles de las ubicaciones urbanas.

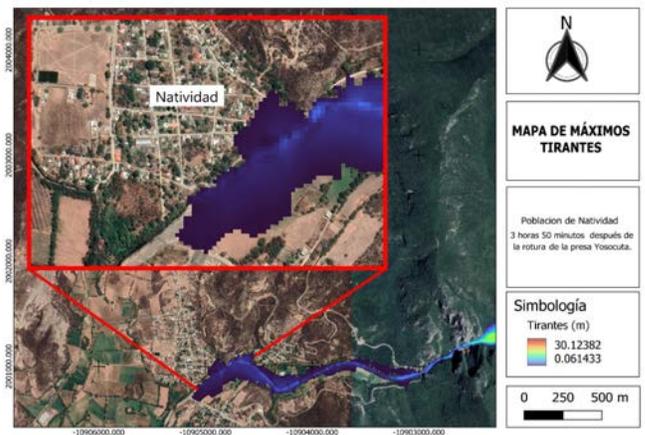
En la zona de la PTAR el tirante máximo casi llega al metro y en cuestión de la velocidad máxima se encuentra en 1.02 m/s, lo que lo coloca dentro de los parámetros para considerarlo zona peligrosa, se determina como zona de inundación peligrosa media, a continuación, la siguiente imagen muestra el área alcanzada por el agua en Santo Domingo Tonalá a las 4 horas después de la rotura de la presa (**Figura 13**).

**Yetla de Juárez**

La población de Yetla de Juárez se encuentra a 26.221 km de distancia de la presa Yosocuta y



**Figura 11.** Visualización de la zona afectada en San Marcos Arteaga.



**Figura 12.** Visualización del área afectada de la población de Natividad.

**Tabla 5.** Tirantes máximos, velocidades y caudales máximos de Natividad.

Ubicaciones	Tirante máximo	Velocidad máxima	Caudales máximos
	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)
Rayón	1.04	0.41	0.38
Victoria	0.5	0.31	0.23
Madero	0.45	0.51	0.29
Juárez	0.54	0.19	0.1

pertenece al municipio de Santo Domingo Tonalá, los cultivos afectados por el nivel del agua serán de 46.921 ha y el área urbana es de 3.479 ha, dentro del área urbana se encuentran 23 viviendas y 82 habitantes, tiene 4 calles que serán alcanzadas por

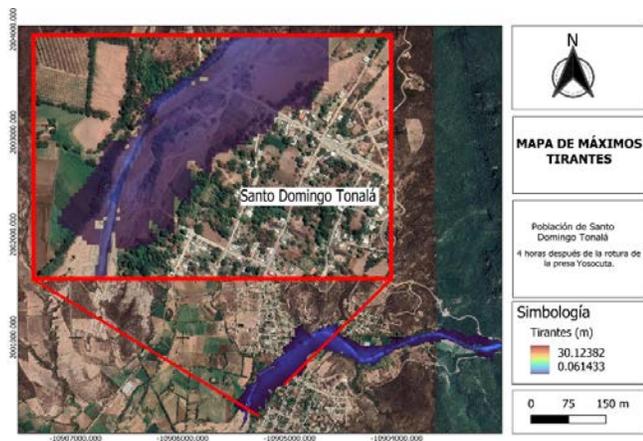


Figura 13. Vista de afectaciones en Santo Domingo Tonalá.

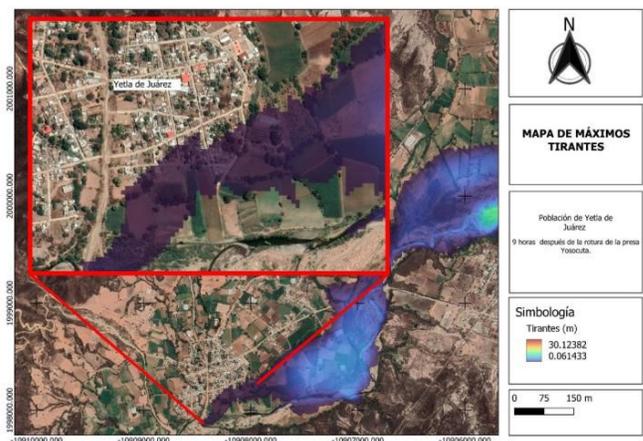


Figura 14. Vista de la zona de afectación de Yetla de Juárez.

los niveles de agua, en total estas calles tienen una longitud de 4.41 km, en la **Tabla 7** se muestran los detalles

La tabla anterior muestra tirantes por debajo de la zona de inundación peligrosa en la parte del tirante, sin embargo, en algunas se muestra una velocidad superior a 1 m/s que supone un peligro para las personas y vehículos, se determina una zona de inundación peligrosa baja. La **Figura 14** muestra las calles que serán alcanzadas por el agua

Tabla 6. Tirantes máximos, velocidades y caudales máximos.

Ubicaciones	Tirante máximo	Velocidad máxima	Caudales máximos
	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)
Planta tratadora de aguas residuales	0.96	1.02	1.03
Calle Hidalgo	0.63	0.68	0.51

Tabla 7. Tirantes máximos, velocidades y caudales máximos de Yetla de Juárez.

Ubicaciones	Tirante máximo	Velocidad máxima	Caudales máximos
	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)
Reforma	0.54	1.52	0.84
Manuel Pino	0.15	0.4	0.12
Valentín Gómez Farías	0.29	1.09	0.33
Melchor Ocampo	0.76	1.38	1.07

en la población de Yetla de Juárez a las 9 horas después del rompimiento de la presa Yosocuta.

### Discusión

El enfoque de este trabajo consiste en la mitigación de inundaciones ante la rotura de la presa, así como establecer medidas previas y durante la rotura. A razón de abundar más en el tema, como medidas de mitigación para la zona de estudio se puede trabajar en posteriores análisis, el establecer una zona de acumulación del flujo, que pueda regular en gran medida el escurrimiento aguas arriba, en la comunidad de San Marcos Arteaga, donde se tiene una extensión de 150 hectáreas de cultivo que puede ayudar como un sistema de control del flujo, si a toda esa zona se excava a una profundidad de 2 metros, se puede tener una zona que puede retener 4.5 hm<sup>3</sup>, es decir una regulación del 17 % del total de flujo que debe de ayudar en gran medida al escurrimiento que se producirá por el efecto de la rotura.

Otras medidas que se pueden establecer, es el dragado del río en zonas donde se tengan llanos o cercanas a las comunidades para generar una mayor área hidráulica, además de diseñar en los primeros 5 km gaviones que puedan contener en primera estancia un flujo mayor a 3000 m<sup>3</sup>/s, que puedan contribuir a reducir la velocidad del escurrimiento de la salida de la presa. Por otra parte, si se tomaran medidas no estructurales, las dependencias como protección civil pueden dar conocer mediante mapas

las zonas de afectación que se pueden tener a raíz de un evento de esta magnitud, con lo que se pueden establecer medidas como rutas de evacuación, sistemas de alertamiento en cada comunidad y establecer un esfuerzo conjunto para evitar pérdidas humanas y materiales.

Arias y Llaguno (2023) Realizaron un análisis de las pérdidas económicas que se pueden llegar a tener, tomando en consideración que un riesgo alto corresponde un 100% de pérdidas, riesgo medio un 50 % y riesgo bajo 30% de pérdida de bienes muebles; resultando que para Santo Domingo Tonalá se tiene una pérdida económica estimada de 11.699 millones de pesos, mientras que para San Marcos Arteaga corresponde una pérdida de 65.124 millones de pesos, por lo que se requiere tanto del diseño de medidas estructurales como de medidas no estructurales para mitigar los efectos de la rotura.

Con base en los trabajos previos de Gaagai *et al.* (2022), quienes estudiaron los efectos de la ola de inundación ante el fallo hipotético de la presa Yabous, ubicada al noreste de Argelia, y de Silva y Eleuterio (2023), quienes investigaron la efectividad de sistemas de alerta específicos en la mitigación de pérdidas en zonas densamente pobladas, un punto importante a destacar es la incertidumbre que se puede tener por los parámetros que se agregan al modelo hidráulico, el mecanismo de rotura, ancho de la rotura, duración de la rotura y el nivel del embalse. Rizzo *et al.* (2023) y Sarchani *et al.* (2022) destacan a los éstos como los factores principales que requieren para un estudio con mayor precisión, necesidad inherente para la gestión eficaz del riesgo, ya que en México existen más de 5000 presas (INEGI, 2024).

## Conclusiones

Se obtuvo un volumen de agua vertida en el río de 26.06 hm<sup>3</sup>, el volumen de almacenamiento de la presa en el modelo hidráulico era de 27.29 hm<sup>3</sup>. El municipio de San Marcos Arteaga ubicado aproximadamente a 6 km de la presa y que será alcanzada a los 50 minutos después de la rotura de la presa, tendrá inundaciones que entran dentro de los parámetros de inundación peligrosa con una velocidad de 4.58 m/s en promedio con un tirante de

hasta 23.24 metros, estos parámetro se determinan peligrosos para las personas y para los vehículos, el nivel del agua prácticamente tendrá repercusión en gran parte del pueblo afectado hasta 291 casas y 46.40 ha de cultivos, se determina como zona de inundación de peligro alto.

El pueblo de Natividad el escurrimiento superficial llegará a las 3 horas, afectando 12 viviendas y 43 habitantes, los niveles del agua llegarán a los parámetros de zona peligrosa de inundación superando el metro al igual que las velocidades rebasan el valor de 1 m/s, se determina que es una zona de inundación baja. En Santo Domingo Tonalá, el agua proveniente de la rotura llegará después de 4 horas, afectando a la PTAR, 21 habitantes y 48.66 ha de cultivos, el tirante máximo está por encima de 1 m y las velocidades máximas por arriba del 1 m/s lo coloca en zona de riesgo, se determina como zona de inundación peligrosa media.

La población de Yetla de Juárez será alcanzada por el agua a las 9 horas después de la creación de la brecha en la cortina, afectando a 82 habitantes y 46.92 ha de cultivos, con velocidades que estarán por arriba del metro y 1 m/s, se determinó como una zona de inundación peligrosa baja. Se calcula un área total de 141.98 ha de cultivos alcanzados por el nivel del agua, debido a la cantidad de áreas de cultivo afectadas, se puede determinar que la rotura de la presa provocará pérdidas económicas para los agricultores, además del daño a cultivos destinados al autoconsumo.

Es importante mencionar que mantener en buen estado y dar constante mantenimiento a este tipo de estructuras hidráulicas puede ser un factor crucial a futuro, ya que disminuye el riesgo de que ocurra un escenario de rotura de la cortina de la presa.

## Agradecimientos

Al Organismo de Cuenca Balsas (OCB) de la Conagua, por la facilidad en proporcionar la batimetría de la presa.

## Referencias

Acosta Y (2021). Evaluación de la acumulación de azolves en embalses ubicados en la rh-24. Chihuahua: Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua.

Arias JC, Llaguno O (2023) Estudio para la generación de mapas de riesgo por inundación ante la rotura de la presa Yosocuta, Estancia de investigación, Grupo Delfín.

Bladé E, Cea L, Corestein G, Escolano E, Puertas J, Vázquez-Cendón E, Dolz J, Coll A (2014) Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30(1):1-10. doi:10.1016/j.rimni.2012.07.004

Chow V (1994). Hidráulica de canales abiertos. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW.

CIMNE (s.f.). Pre and post processing system for F.E.M. calculations. Recuperado el 03 de marzo de 2023, de International Center For Numerical Methods In Engineering: <https://acortar.link/3KCmFs> [Consultado el 05 de mayo del 2023]

CONAGUA (2012). «Inventario de presas». <https://presas.conagua.gob.mx> [Recuperado el 08 de mayo del 2023]

Estrada D. “Denuncian contaminación de la presa de Yosocuta, en Huajuapán de León”. Obtenido de diario Imparcial Oaxaca: <https://acortar.link/jR93uc> [recuperado el 25 de abril de 2018]

Gaagai A, Aouissi HA, Krauklis AE, Burlakovs J, Athamena A, Zekker I, Boudoukha A, Benaabidate L, Chenchouni H (2022) Modeling and Risk Analysis of Dam-Break Flooding in a Semi-Arid Montane Watershed: A Case Study of the Yabous Dam, Northeastern Algeria. *Water* 14 (5):767. doi:10.3390/w14050767

GEAMA (s.f.). Iber, modelo de flujo en lámina libre para ríos y estuarios. <http://geama.org/hidraulica/index.php?s=11&i=27> [Recuperado el 09 de marzo de 2023]

Huajuapán de León (2019). Plan municipal de desarrollo. Heroica Ciudad de Huajuapán de León: Gobierno municipal, Gobierno municipal.

ICOLD (s.f.). Definition of a Large Dam. Recuperado el 15 de marzo de 2023, de ICOLD: [https://www.icold-cigb.org/GB/dams/definition\\_of\\_a\\_large\\_dam.asp](https://www.icold-cigb.org/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp) [Recuperado el 13 de marzo de 2023]

INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos> [Recuperado el 27 de marzo de 2023]

INEGI. (2023). Continuo de elevaciones mexicano. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/> [Recuperado el 05 de abril de 2023]

INEGI (2023). Temas, mapas temáticos de México. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>

[Recuperado el 10 de Abril de 2023]

INEGI (2024) Cuéntame en territorio – presas, obtenido de <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/presas>. [recuperado el 08 de agosto del 2024 ]

Martínez Ramírez S (2010). El manejo sustentable de la cuenca alta del Río Mixteco. Obtenido de UTM: <https://www.utm.mx/~cseminariosinvestigacion/enero10.html> [Recuperado el 7 de abril del 2023]

MMA (2021). Guía Técnica para la elaboración de los planes de emergencia de presas. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.

Municipio de San Nicolás Hidalgo, Silacayoapan (2011). Plan municipal de desarrollo. San Nicolás Hidalgo: Municipio de San Nicolás Hidalgo, Silacayoapan.

Nava J, Llaguno O, Rodríguez J (2019). Simulación de rotura de la presa de la Olla con la plataforma Iber, *Revista tlaloc*, num. 70 enero - marzo.

OCB. (2012). Plano de estudio topobatómico de la presa Yosocuta. Cuernavaca, Morelos, México.

Rizzo C, Maranzoni A, D’Oria M (2023). Probabilistic mapping and sensitivity assessment of dam-break flood hazard. *Hydrological Sciences Journal* 68(5):700-718. doi:10.1080/02626667.2023.2174026

Sarchani S, Koutroulis AG (2022). Probabilistic dam breach flood modeling: the case of Valsamiotis dam in Crete. *Nat Hazards* 114:1763-1814. doi:10.1007/s11069-022-05446-0

SCS (1972). National Engineering Handbook, section 4. US Department of agriculture.

Silva AFR, Eleutério JC (2023) Analysis of flood warning and evacuation efficiency by comparing damage and life-loss estimates with real consequences related to the São Francisco tailings dam failure in Brazil. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 23 (9):3095-3110. doi:10.5194/nhess-23-3095-2023

SRI (2016). Reportaje, presa de Yosocuta el manantial a punto de morir. Obtenido de SRI: <https://acortar.link/LpYZTh> [Recuperado el 01 de abril del 2023]

Témez JR (1992). Inundaciones y redes de drenaje urbano, Control del desarrollo urbano en las zonas inundables (págs. 105-115). Madrid.

Toledo A, Ramírez H, López M (2008). Gaceta parlamentaria. Obtenido de Senado de la república: [https://www.senado.gob.mx/65/gaceta\\_comision\\_permanente/documento/16915](https://www.senado.gob.mx/65/gaceta_comision_permanente/documento/16915) [Recuperado el 02 de mayo del 2023]



# Evaluación de los recursos hídricos en el acuífero “Área Metropolitana de Monterrey” en la última década y sus implicaciones en la crisis hídrica de la zona

## Evaluation of water resources in the “Monterrey Metropolitan Area” aquifer in the last decade and its implications in the water crisis in the area

Ulises Absalom Barajas Madrigal, José Jaime Madrigal Barrera\*<sup>ID</sup>, Liliana García Romero, Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

### Historial

Manuscrito recibido: 19 de enero de 2024

Manuscrito aceptado: 21 de junio de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

José Jaime Madrigal Barrera

e-mail: jose.madrigal@umich.mx

ORCID: 0000-0002-3142-8152

### Resumen

Producto de la crisis hídrica vivida en el área Metropolitana de Monterrey durante el año 2022, se realizó una modelación hidrológica superficial y subterránea para analizar los niveles piezométricos del acuífero y establecer las causas probables de la problemática. Se recopiló información climática, hidrométrica, fisiográfica, hidrogeológica y de extracciones. Mediante métodos estadísticos se validaron y completaron los datos climáticos e hidrométricos y se calculó la evapotranspiración potencial. Se montaron y calibraron los modelos superficial y subterráneo, siendo los modelos HBV y MODFLOW, respectivamente, para obtener los niveles piezométricos. Se observó que el acuífero presenta signos de recuperación de alrededor del 2% en sus niveles en años recientes, indicando que la problemática probablemente sea la creciente demanda originada por el aumento poblacional y que no se debe únicamente a factores climáticos.

**Palabras clave:** Monterrey, Acuífero, Modelación hidrológica.

### Introducción

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se ha constituido como una de las tres principales urbes de México y un gran motor económico para el país. Se encuentra ubicada en una región semidesértica con poca disponibilidad natural del agua debido a la gran variabilidad existente en las precipitaciones, esto representa un reto constante para la obtención de este recurso vital para una población creciente cuyas demandas de agua cada vez son mayores. Durante el año 2022 el AMM experimentó una de

### Abstract

As a result of the water crisis experienced in the Metropolitan area of Monterrey during 2022, a hydrological modelling was conducted to analyze the aquifer's water tables and establish likely causes of the issue. Climate, hydrometric, physiographic, hydrogeological, and extraction data were collected. Statistical methods were used to validate and complete climate and hydrometric data and calculate potential evapotranspiration. Hydrological models were set up and calibrated to obtain water tables, being the HBV and MODFLOW models, respectively. It was observed that the aquifer has shown signs of recovery of about 2% in recent years, indicating that the problem is likely due to the growing demand caused by population increase.

**Keywords:** Monterrey, Aquifer, Hydrologic modelling.

las mayores sequías de las que se tiene registro, afectando principalmente a la población, quienes experimentaron cortes en el servicio de agua nunca vistos en la zona. Tan sólo unos meses después, al llegar la temporada de lluvias, lo que estaba siendo un evento extremo de escasez, pasó a ser un evento de abundancia, presentándose fuertes lluvias e inundaciones en la metrópoli. Esto levanta interrogantes acerca de si este tipo de eventos de sequía hidrológica son derivados de los cambios recientes en las tendencias climáticas o por el incremento

de la población y sus cambios en los hábitos en el consumo de agua. Actualmente el AMM se abastece principalmente de fuentes de aguas superficiales siendo las presas La Boca, El Cuchillo y Cerro Prieto las que constituyen la infraestructura hidráulica de la metrópoli, representando un 62% del suministro total, siendo el 38% restante de fuentes subterráneas (Aguilar y Ramírez, 2021), por lo cual, el estudio de dichas fuentes resulta de gran interés para el entendimiento de las condiciones en las que se encuentran y evaluar su estado. Se vuelve aún más relevante considerando que exceptuando los informes de disponibilidad por acuíferos que emite la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), no existen estudios específicos que evalúen el estado del acuífero AMM.

A lo largo del tiempo, en el AMM se han realizado numerosas investigaciones relacionadas con el estudio del agua en la zona. Murillo (1986) evaluó la calidad del agua en el acuífero del AMM, además de determinar la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Se identificaron y analizaron pozos y sus resultados revelaron la presencia de tres tipos de agua predominantes en el acuífero (mixta cálcica, bicarbonatada cálcica y sulfatada cálcica). Se identificaron zonas potencialmente contaminadas en algunos pozos, cerca del 80% de las muestras cumplían con las normas de calidad de agua potable, y se propuso una dirección de flujo hacia el Nornoreste y Noreste del AMM.

Cedillo (2012) evaluó los recursos hídricos en la Zona Metropolitana de Monterrey utilizando un programa de simulación llamado Water Evaluation Planning System (WEAP). Se consideraron fuentes de agua superficiales y subterráneas utilizadas por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, utilizando datos de varias fuentes. Se simuló el período entre 2005 y 2009, proyectándolo al año 2025, incluyendo escenarios hipotéticos. Los resultados indicaron que, si se mantenían las condiciones actuales de extracción, los recursos hídricos se explotarían en exceso y se podrían agotar acuíferos y generar estrés en las fuentes superficiales. Sin embargo, se encontró que, con una gestión adecuada, como la eficiencia en la distribución y la reutilización de aguas residuales por la industria, se podría satisfacer

la demanda urbana hasta 2025, lo que aliviaría la presión sobre el recurso. En todos los escenarios, los usuarios agrícolas y domésticos podrían experimentar una disminución en la confiabilidad de su suministro debido a la alta demanda urbana. Se concluyó que era necesario seguir trabajando en la gestión integral de los recursos hídricos.

Salinas (2015) encontró que la rápida expansión de los desarrollos humanos en los últimos años a nivel global ha suscitado un interés significativo en diversas áreas de investigación, como el suministro de agua potable, el cambio climático, las energías renovables, la huella hídrica y el desarrollo sostenible. El objetivo de la investigación de Salinas (2015) fue proponer medidas para mitigar el impacto ambiental causado por esta expansión y reducir el deterioro del planeta, planteando métodos para encontrar zonas potenciales para captar agua de lluvia para su aprovechamiento.

Galván (2013) realizó un reconocimiento geológico y prospección geoelectrica detallada, utilizando mediciones de resistividad en el subsuelo. El objetivo era determinar los tipos de materiales presentes, sus espesores, estructuras geológicas y la presencia de zonas con agua subterránea, particularmente canales de grava. Se empleó la técnica de tomografía geoelectrica para identificar áreas adecuadas para la perforación de pozos de extracción de agua. Los resultados de esta prospección condujeron a la ubicación de un sitio para perforar un pozo mediante máquina de percusión, lo cual fue validado por la litología previamente determinada con la tomografía geoelectrica.

En la presente investigación se aborda la problemática relacionada con la gestión de recursos hídricos en el AMM, teniendo en cuenta la variabilidad en las precipitaciones, el rápido crecimiento demográfico, las condiciones climáticas extremas y los desafíos en la disponibilidad de agua en la región, tomando como punto focal la sequía hidrológica suscitada en los últimos años. Se busca comprender el estado actual de las fuentes subterráneas de agua en el AMM y determinar los principales factores que detonaron la crisis hídrica reciente en la región, mediante el uso de los modelos hidrológicos HBV y MODFLOW.

## Materiales y métodos

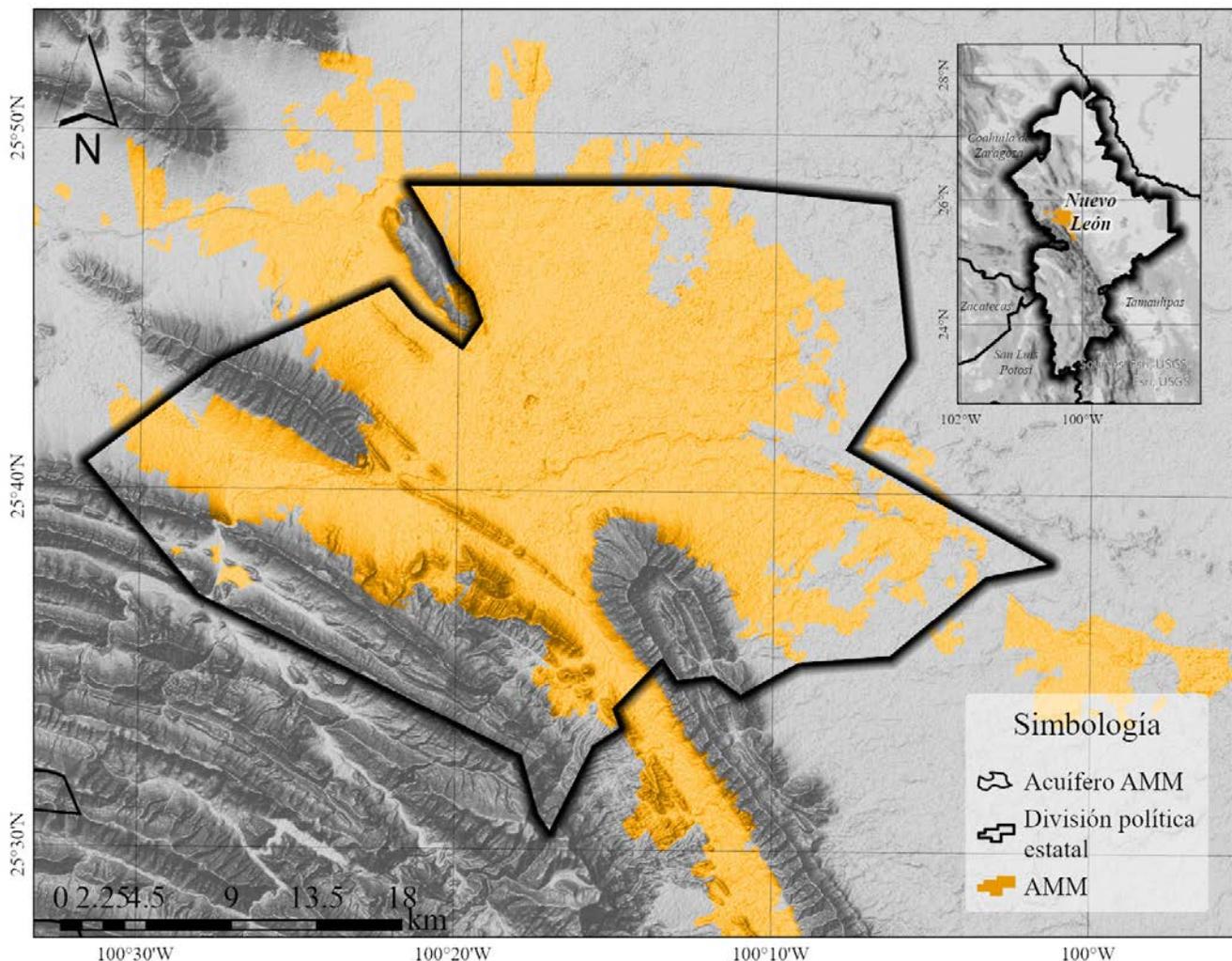
La zona de estudio es el acuífero homologado del Área Metropolitana de Monterrey (**Figura 1**). Este debe su nombre a que se encuentra ubicado justo sobre el AMM, en el estado de Nuevo León.

La metodología seguida en el desarrollo de esta investigación consiste en la recopilación de toda la información requerida, la validación de la información climática e hidrométrica para su adecuada utilización posteriormente en el cálculo de la evapotranspiración potencial y el montaje y calibración de los modelos superficial y subterránea, para finalmente determinar los niveles piezométricos de la zona y hacer su correspondiente análisis. Lo anterior dicho se muestra también en el diagrama de flujo de la **Figura 2**.

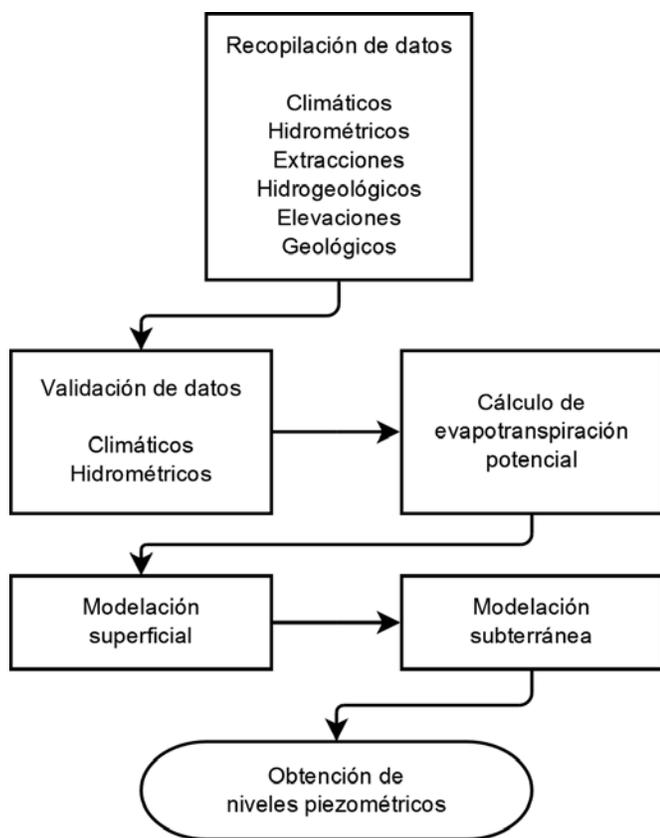
## Recopilación de datos

Los datos climáticos se obtuvieron de la base de datos del Sistema de Información Hidrológica (SIH) administrado por la CONAGUA en donde se consultan los datos de diferentes estaciones climáticas. Se hizo la consideración de que estas deben tener la mayor cobertura posible sobre la zona de estudio, estas estaciones cuentan con información de múltiples variables, siendo de interés para esta metodología datos diarios de precipitación y temperatura media, contando con información en el periodo 1920-2022, y considerando el periodo 1945-2022 para esta investigación

Los datos hidrométricos de escurrimiento provienen de estaciones hidrométricas las cuales se encuentran en la base de datos del Banco Nacional



**Figura 1.** Ubicación del acuífero del AMM.



**Figura 2.** Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) operado por la CONAGUA. Estas estaciones registran el nivel y la cantidad de agua que pasa en diferentes escalas temporales, siendo de interés para esta metodología, recopilar los datos diarios de caudal, contando con información en el periodo 1920-2022, y considerando el periodo 1945-2022 para esta investigación.

La selección de las estaciones hidrométricas debe ser más cuidadosa que la de estaciones climáticas, deben tener la mayor cobertura posible de la zona de estudio en función de las cuencas drenadas por dichas estaciones; pero, a su vez, se debe verificar que las estaciones se encuentren ubicadas sobre cauces en su régimen natural y no sobre alguna obra hidráulica, ya que se pretende que los datos obtenidos representen las condiciones naturales de una corriente de agua.

Los datos de extracciones corresponden a las concesiones de aprovechamientos subterráneos y estos se obtuvieron del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) administrado por la CO-

NAGUA. De este portal se han de recopilar, no solo los volúmenes concesionados, sino que también, la localización de estos aprovechamientos y el tipo de uso, contando con información en el periodo 1993-2022, y considerando el periodo 1993-2022 para esta investigación

Los datos hidrogeológicos pueden ser recopilados de estudios o informes realizados en la zona de estudio, una de estas fuentes puede ser los informes de actualización de disponibilidad media anual de aguas subterráneas de los acuíferos administrados por la CONAGUA. Dichos informes se han publicado desde el año 2002 y en ellos se pueden encontrar en algunos casos, rangos de valores para algunos parámetros hidrogeológicos, tales como la transmisividad hidráulica, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, debido a la falta de estudios, se vuelve evidente la carencia de esta información en diversas zonas, por lo que, de no contar con estos datos, se puede consultar bibliografía de valores medios de estos parámetros según la geología de la zona de estudio.

Para obtener datos de elevaciones de terreno, se utilizó información cartográfica proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Estos datos de elevaciones se obtienen a partir de modelos digitales de elevación, los cuales permiten representar las variaciones altimétricas del terreno de la zona de estudio. Dichos modelos digitales de elevación son de tipo terreno con una resolución espacial de 15 m.

Los datos geológicos provienen de cartas geológicas ofrecidas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) de las cuales se puede obtener información de litología, formaciones geológicas, entre otros datos de interés. Dichas cartas geológicas han tenido ediciones periódicamente, desde el año 1960 hasta el año 2015, considerándose las del año 2015 para esta investigación.

En el portal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) se obtuvieron diversas capas temáticas, siendo de uso y tipo de suelo las que permiten tener una clasificación del suelo, identificando los diferentes tipos de materiales, áreas urbanizadas, agrícolas, fores-

tales, entre otras categorías. Estas capas temáticas se encuentran georreferenciadas y en formato shapefile.

### Validación de datos

Para la validación de datos climáticos de precipitación se utilizaron pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia que permiten dividir un conjunto de datos y determinar si tienen la misma distribución y si dos variables tienen relación alguna o si son completamente independientes. Las pruebas por realizar son: Secuencias (Mather, 1975), Helmert (Doorembos, 1976), Curva Masa Doble (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006), t de Student (Kishore *et al.*, 2016), Cramer (Deka *et al.*, 2016), Wald-Wolfowitz (Siegel y Castellan, 1988) y Límites de Anderson (Anderson, 1942). Se toma como criterio de aceptación aquellas estaciones que cumplan con al menos cuatro de seis pruebas de homogeneidad y que sean independientes.

La validación de datos hidrométricos se realizó mediante la determinación y análisis del coeficiente de escorrentía (Chow *et al.*, 1988) y el Módulo Relativo (Sánchez 2017). El coeficiente de escorrentía es la relación entre el volumen escurrido y el volumen precipitado, por lo que este valor debe estar comprendido entre 0 y 1. El Módulo Relativo es la relación entre el caudal y la superficie de la cuenca, de acuerdo con Sánchez (2017) los módulos relativos han de estar comprendidos entre 5 y 15 (l/s)/km<sup>2</sup>.

Dichos indicadores son orientativos, dada la compleja naturaleza de este tipo de datos, los resultados de coeficiente de escorrentía y módulo relativos no forman parte de un criterio de aceptación o descarte. Queda a criterio del modelador en función de la consideración de las condiciones particulares de la zona de estudio. Para la metodología utilizada se considera la utilización de información hidrométrica que cumpla con los límites establecidos por los indicadores previamente descritos.

### Cálculo de evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se calculó por medio del método de Thornthwaite (Wilm *et al.*, 1944), el cual calcula la evapotranspiración

potencial mensual en función de las temperaturas medias mensuales y un índice de calor anual, de esta manera se obtienen las evapotranspiraciones a escala mensual.

### Estimación de datos faltantes

El llenado de datos faltantes de precipitación se realizó por medio del método *Inverse Distance Weighting* (IDW), el cual calcula valores desconocidos con un promedio ponderado de los valores disponibles en puntos conocidos, asignando pesos a cada punto conocido en función de la distancia entre estaciones. Este método es ampliamente utilizado en el contexto de la climatología (Barrios *et al.*, 2018).

La variabilidad temporal de la temperatura no es significativa por lo que el llenado de datos faltantes de temperatura se realiza mediante medias mensuales de cada estación.

### Modelación superficial

La modelación hidrológica superficial es un proceso mediante el cual se simula el comportamiento del ciclo hidrológico en la superficie terrestre. Esta técnica se utiliza para estimar la distribución, el flujo y la cantidad de agua que se mueve a través de una cuenca hidrográfica o una región específica en respuesta a las condiciones climáticas y geográficas.

Para llevar a cabo la modelación hidrológica, se utilizaron modelos matemáticos y computacionales que se basan en principios físicos y empíricos. Estos modelos toman en cuenta datos climáticos históricos, características del suelo, topografía, vegetación y otros factores relevantes para simular cómo se comportará el flujo de agua en una cuenca o región específica. Estos modelos son conocidos como Modelos Precipitación-Escorrentamiento (MPE), de los cuales existen una amplia gama de modelos con diferente conceptualización teórica y número de parámetros: en la presente metodología se plantea utilizar el modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalsavdelning (HBV).

El modelo HBV (Bergström, 1976) es un modelo conceptual con rutinas que considera la humedad del suelo, humedad en la celda subsuperficial y la humedad en la celda subterránea a partir de datos de entrada de precipitación y evapotranspiración

potencial ya sea a escala diaria, mensual o anual. La salida del modelo es la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca y esta se compone de la escorrentía superficial, el interflujo y flujo base.

Una vez creado el modelo hidrológico superficial, este se debe calibrar. La calibración consiste en encontrar la combinación de parámetros cuyos escurrimientos simulados tengan el mayor ajuste posible a los escurrimientos observados. Este ajuste se ve reflejado en los índices de bondad de ajuste resultantes de cada simulación, los cuales son: Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970), Eficiencia de Nash-Sutcliffe modificado (ln NSE) (Oudin *et al.*, 2006) y Coeficiente de Correlación lineal de Pearson (r) (Blyth, 1994).

Con el modelo calibrado, se procedió a hacer el traslado de parámetros y de series climáticas de la cuenca de calibración a las subcuencas que conforman la zona de estudio. De esta manera se obtienen escurrimientos simulados para la zona de estudio, pero, además, como parte del modelo HBV, se obtiene la recarga al acuífero.

### Modelación subterránea

MODFLOW (MODular Finite-difference Ground-Water Flow) es un software ampliamente utilizado para la modelación numérica del flujo de agua subterránea. Es desarrollado y mantenido por el *U.S. Geological Survey* (USGS) y es considerado uno de los programas más destacados y utilizados en el campo de la hidrogeología.

MODFLOW se basa en el método de las diferencias finitas, que discretiza el dominio subterráneo en una cuadrícula tridimensional de celdas. Cada celda representa un volumen de roca o sedimento y se utilizan ecuaciones matemáticas para describir cómo fluye el agua a través de estas celdas y cómo se intercambia agua con las celdas vecinas.

Mediante este software, se discretiza la zona de estudio en una matriz de celdas donde se definen las celdas activas e inactivas, a la vez que se ingresan los datos de entrada de entradas (recarga) y salidas (extracciones), la fisiografía y parámetros hidrogeológicos.

Una vez montado el modelo con toda esta información, se procede a calibrar el modelo, donde los parámetros a calibrar será el coeficiente de almacenamiento y la conductividad hidráulica. De tal manera que los niveles piezométricos simulados tengan el mayor ajuste a los niveles piezométricos observados. Este ajuste se verá reflejado en el índice de bondad de ajuste del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE).

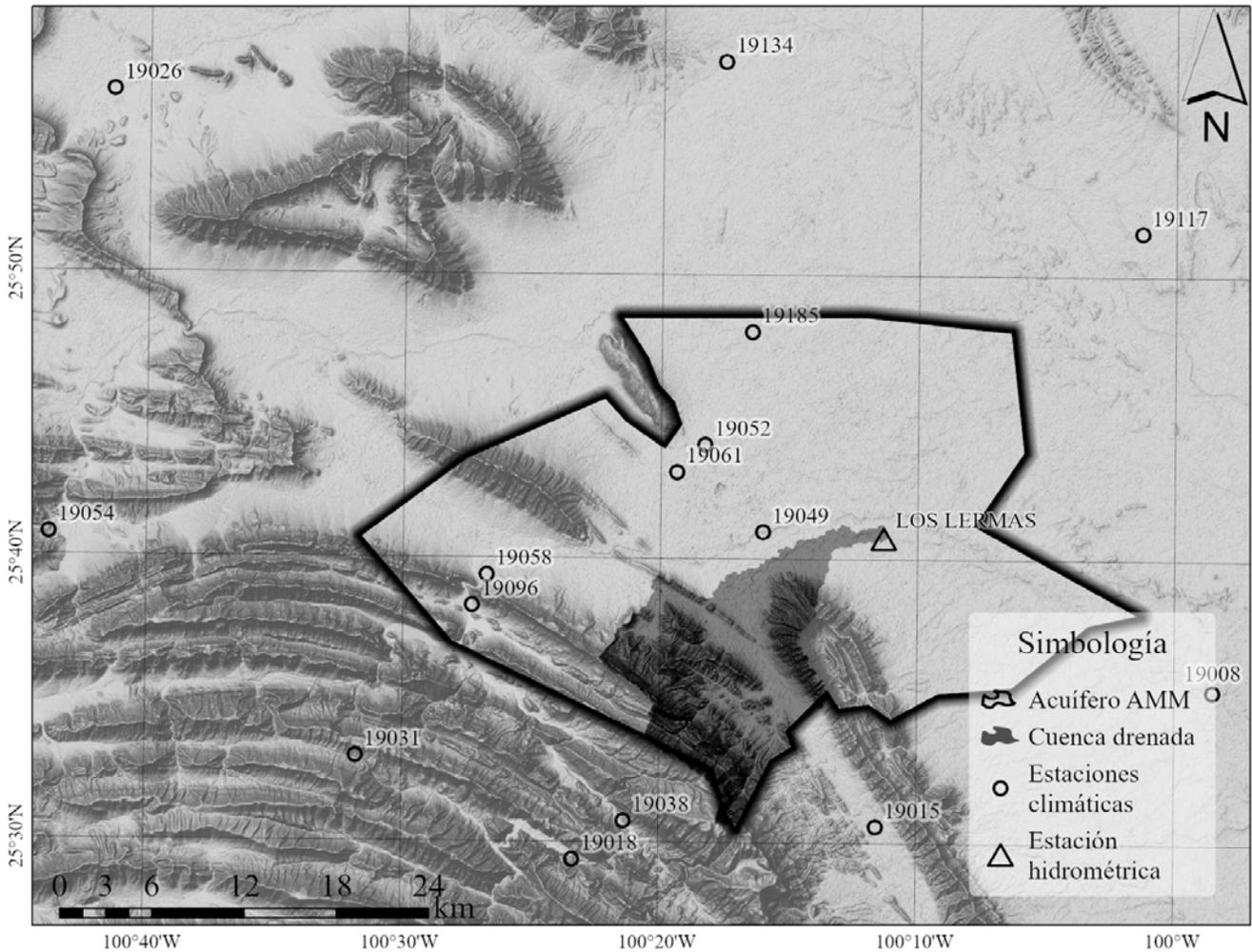
A partir del modelo calibrado se pueden obtener las series temporales y espaciales de los niveles piezométricos de la zona de estudio.

### Resultados

La zona de estudio es el acuífero “Área Metropolitana de Monterrey” ubicado en el estado de Nuevo León. Del SIH se localizaron un total de 18 estaciones climáticas, contando con información constante en el periodo 1945-2022. Estas estaciones se validaron y fueron seleccionadas únicamente 15 estaciones (**Figura 3**). Del BANDAS se localizó una estación hidrométrica cuya cuenca drenada se encuentra dentro de la zona de estudio. Esta estación hidrométrica tiene como nombre *LOS LERMAS* y cuenta con datos en el periodo 1973-1994. El módulo relativo y coeficiente de escurrimiento resultaron de 13.02 (l/s)/km<sup>2</sup> y 0.73, respectivamente.

En el portal del REPDA se encontraron 1312 concesiones de extracciones subterráneas en la zona de estudio para el periodo 1994-2023. El volumen de extracción medio anual es de 141.78 hm<sup>3</sup>. En el informe de “Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Área Metropolitana De Monterrey (1906)” (CONAGUA, 2020), se obtuvieron rangos de valores de transmisividad y conductividad hidráulica. Considerando que en el informe se reporta la existencia de capas de material de aluviones y lutitas, los valores de conductividad hidráulica, según el informe, están comprendidos entre  $1.15 \times 10^{-3}$  a  $1.16 \times 10^{-1}$  y  $1.15 \times 10^{-7}$  a  $9.5 \times 10^{-4}$  m/s, respectivamente, considerando como valores iniciales  $1.2 \times 10^{-2}$  y  $4.8 \times 10^{-4}$  m/s, respectivamente.

De acuerdo con Iglesias (1984), los valores de coeficiente de almacenamiento para aluviones y lutitas están comprendidos entre 0.05-0.15 y 0.0005-0.01, respectivamente. Considerando como



**Figura 3.** Localización de las estaciones climáticas e hidrométricas en relación con la zona de estudio.

valores iniciales 0.02 y 0.01 respectivamente. De las fuentes mencionadas en la metodología para la recolección de información fisiográfica se obtuvieron archivos tipo ráster y vectorial de los conceptos previamente descritos. Los datos faltantes de precipitación y temperatura de las estaciones climáticas se estimaron, completando series de datos en el periodo 1945-2022, llenando un 32% de los vacíos de las series originales (**Figura 4**).

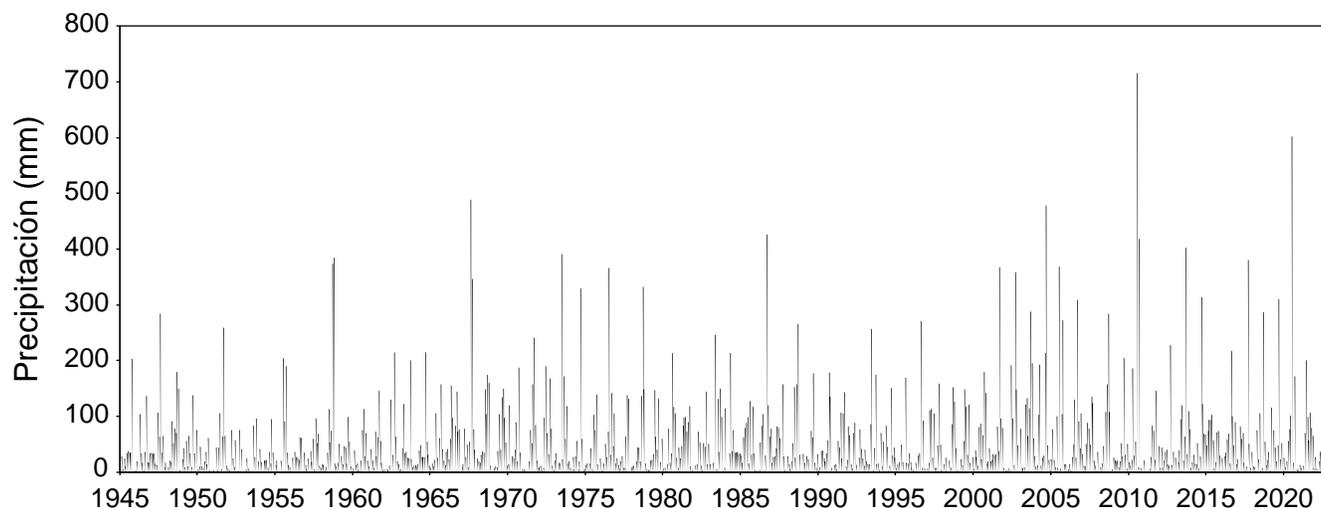
A partir de los datos de temperatura, se calculó la evapotranspiración potencial para el periodo 1945-2022. Se configuró el modelo hidrológico superficial HBV, mismo que fue calibrado para el periodo de 1973-1987 (**Figura 5**).

Los índices de bondad de ajuste resultantes para el modelo calibrado se pueden observar en la **Tabla 1**:

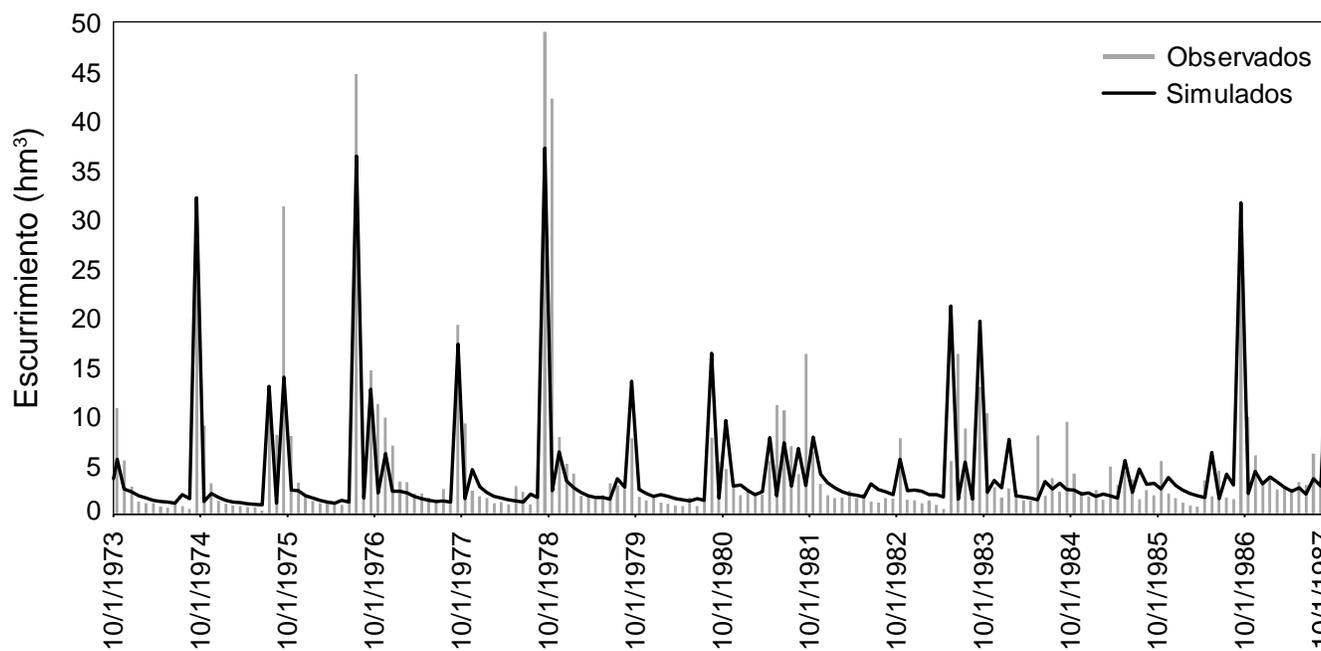
Se delimitaron 8 subcuencas de simulación, las cuales tienen extensión sobre todo el acuífero, por lo que, a partir de los parámetros calibrados del modelo, se hizo un traslado de parámetros y series climáticas a los centroides de las subcuencas. De esta manera se obtuvieron las series de recarga para todo

**Tabla 1.** Valores de los índices de bondad de ajuste del modelo calibrado

Índice	HBV
NSE	0.65
ln NSE	0.57
r	0.82
Promedio	0.68



**Figura 4.** Resultados del llenado de datos faltantes de precipitación en la estación *MONTERREY, NL*.



**Figura 5.** Comparación entre los valores observados y simulados de escurrimiento.

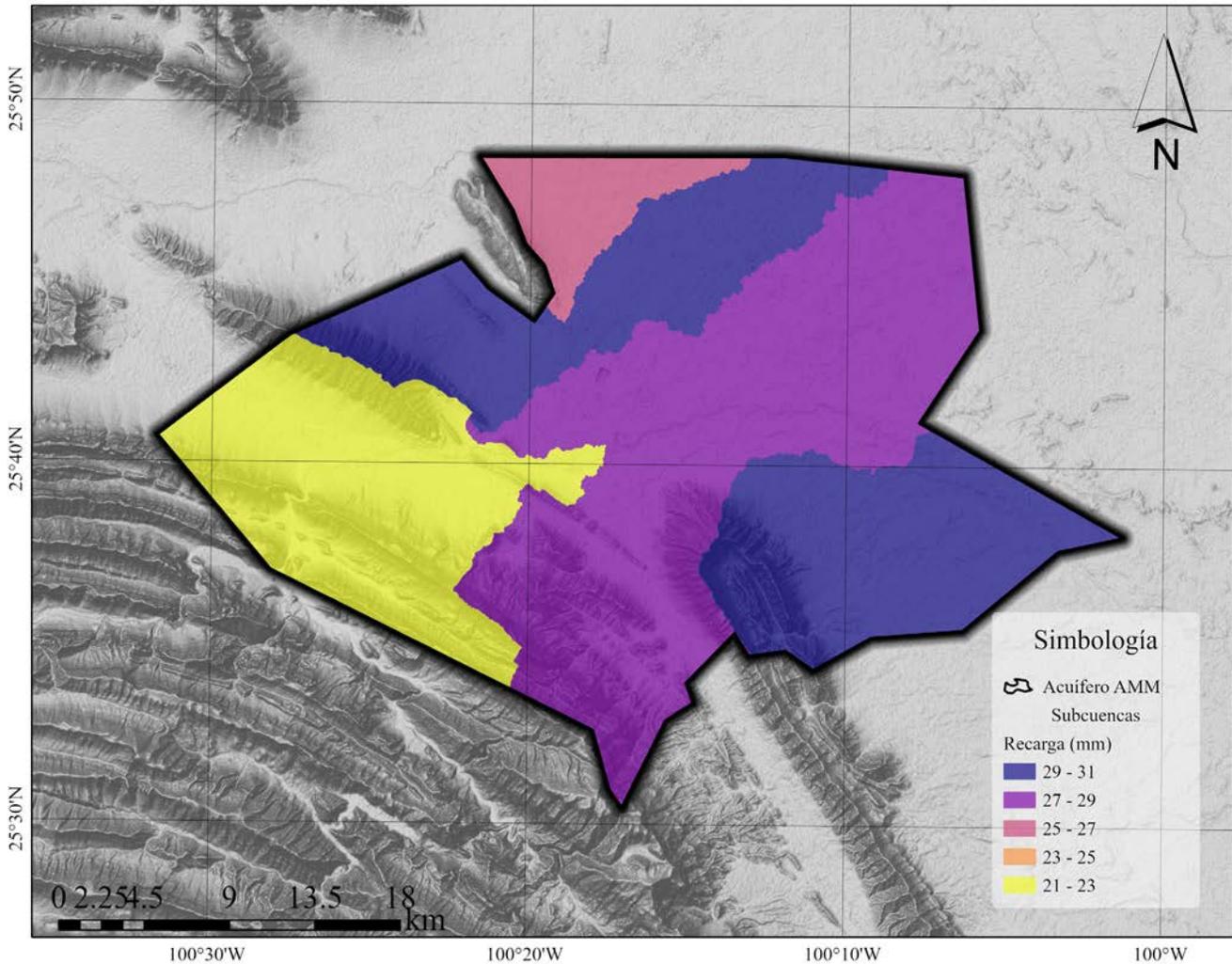
el acuífero para el periodo 1945-2022 (**Figura 6**).

Se montó el modelo hidrológico subterráneo, discretizando la extensión de la zona de estudio en una matriz de 21 columnas y 14 filas, con un tamaño de celda de 2.5 x 2.5 km. Toda la información requerida (celdas activas, recarga, extracciones, fisiografía y parámetros hidrogeológicos) se ingresaron al modelo, logrando así una primera simulación para el periodo 1994-2022.

Se procedió a calibrar el modelo, variando

la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, resultando los valores de  $5.86 \times 10^{-2}$  y  $4.75 \times 10^{-4}$  para aluviones y lutitas, respectivamente, para la conductividad hidráulica, y 0.1 y 0.0052, respectivamente, para el coeficiente de almacenamiento, logrando así los resultados que se observan en la **Figura 7**.

A partir del modelo calibrado se obtuvieron los niveles piezométricos en el acuífero para el periodo 1994-2022. Como ejemplo, en la **Figura 8**



**Figura 6.** Recarga media anual para las subcuencas delimitadas.

se presenta la ubicación de las celdas 115 y 216, en las cuales posteriormente se presentará la evolución del nivel piezométrico **Figura 9**.

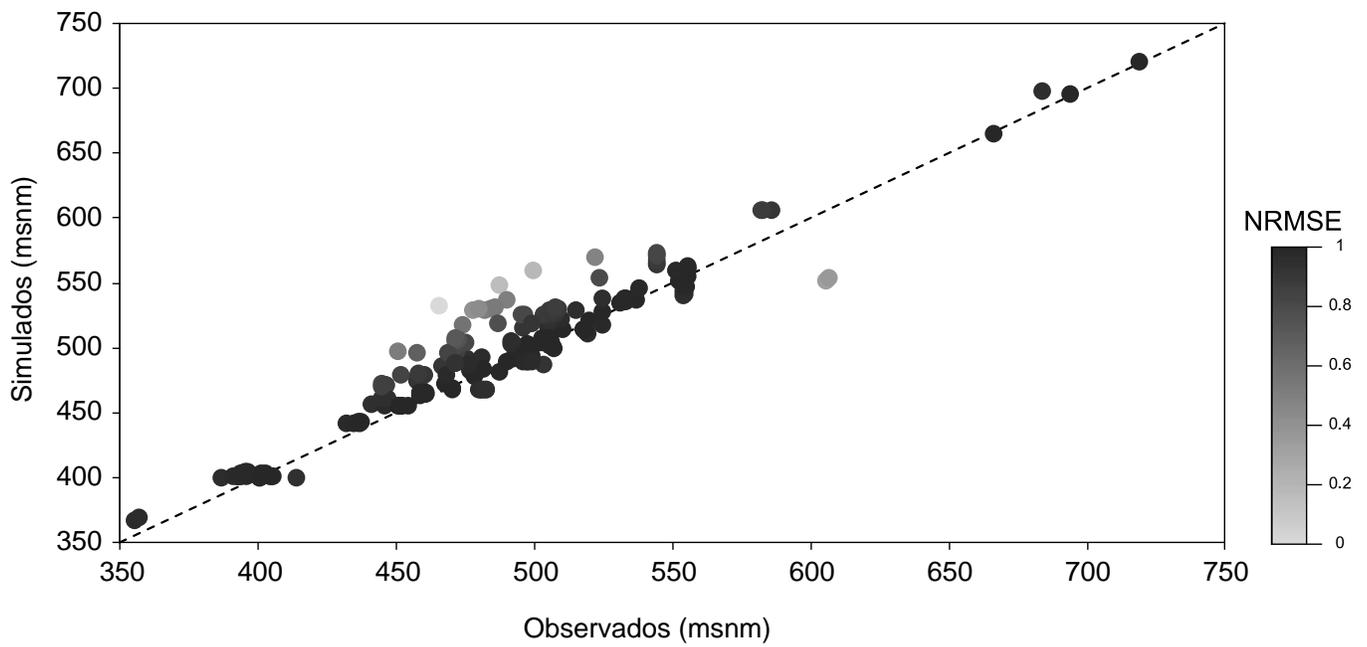
En la **Figura 10** se presenta la distribución espacial de la evolución de los niveles piezométricos en el acuífero del AMM en el periodo 1994-2022.

## Discusión

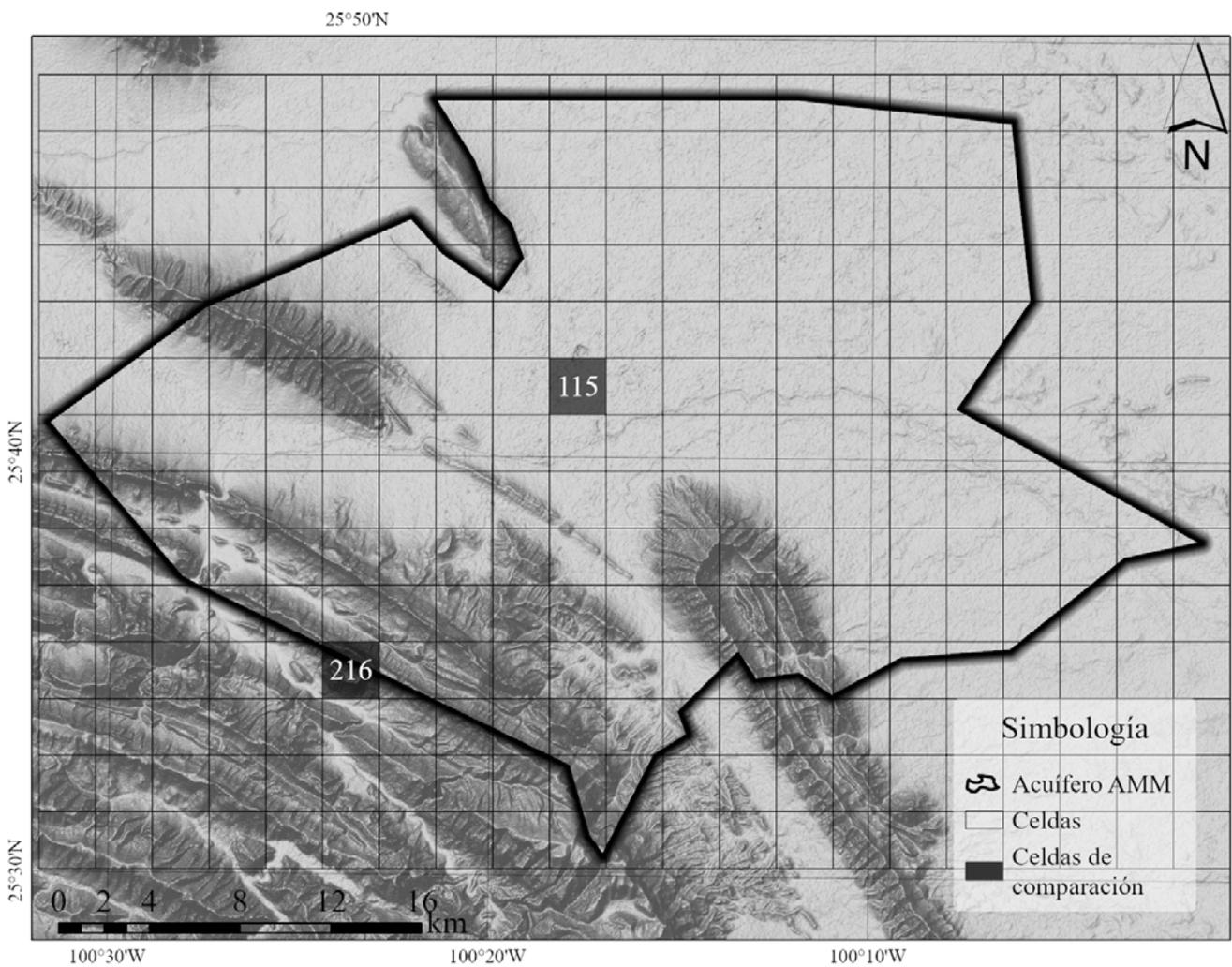
Con base en los resultados obtenidos de los niveles piezométricos simulados del modelo hidrológico subterráneo, se puede establecer que, en las zonas de planicie de la superficie del acuífero, como se observa en la **Figura 9a**, existen signos de recuperación en los niveles piezométricos que se cuantifican de alrededor del 2% en el periodo considerado. Sin embargo, en las zonas montañosas se presentan

abatimientos en los niveles piezométricos tal como se observa en la **Figura 9b**, pudiéndose generalizar lo anterior dicho tal como se presenta en la **Figura 10**.

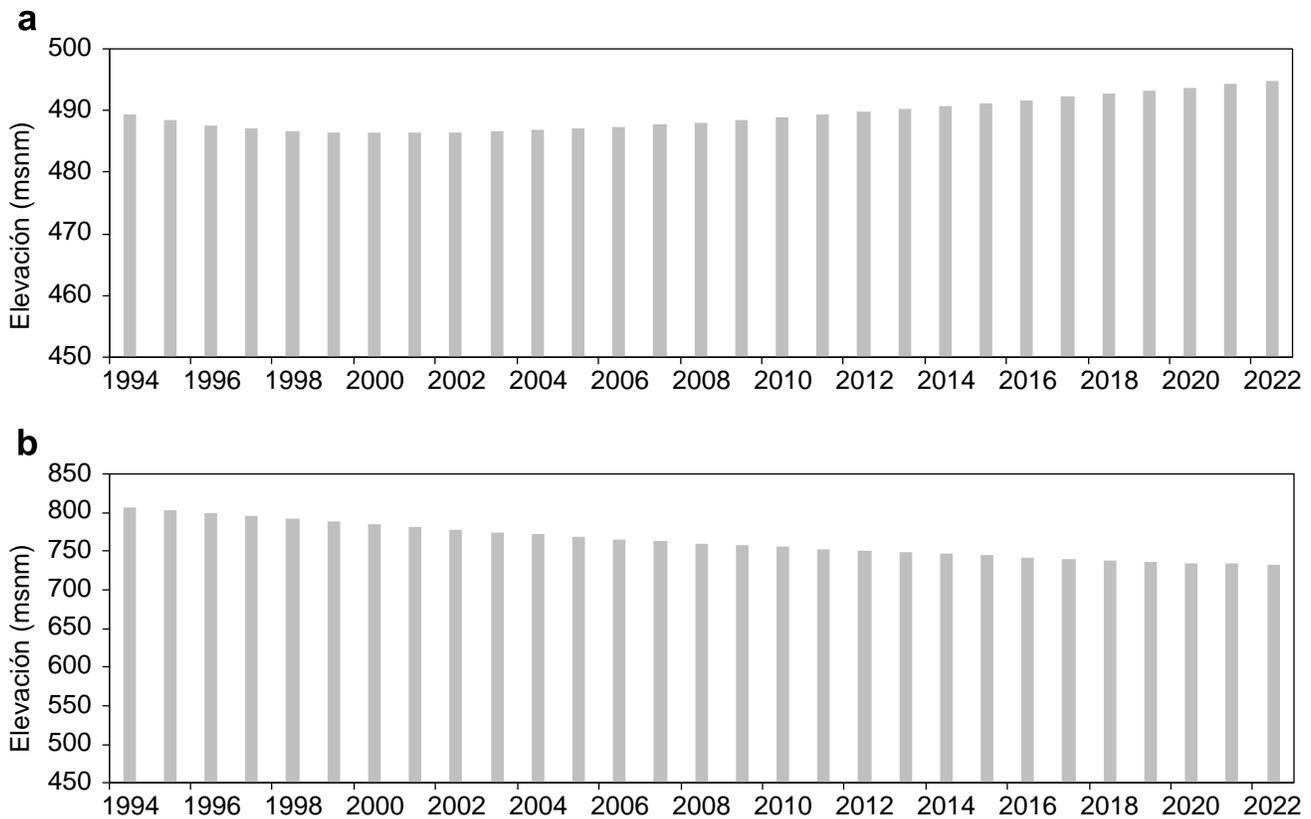
La crisis hídrica que se vivió durante el año 2022 en la zona de estudio tuvo su punto máximo en el mes de junio, caracterizado por sus pocas reservas de agua en las presas y altas temperaturas, siendo la única esperanza para la población y las autoridades que llegase la época de lluvias para mitigar la situación de emergencia. Esto genera incertidumbre sobre si la crisis hídrica fue consecuencia de una disminución de las precipitaciones en la zona o si se debió a otra circunstancia. Para ello, a continuación, se presenta el registro histórico de precipitaciones anuales en la estación climática



**Figura 7.** Comparación entre los valores observados y simulados de niveles piezométricos.



**Figura 8.** Ubicación de las celdas de comparación para la evolución del nivel piezométrico.



**Figura 9.** Evolución del nivel piezométrico en la celda **a)** 115 y **b)** 216.

#### 19049 MONTERREY, NL (Figura 11).

De dicha serie histórica se puede observar que en el periodo 1945-1999 se contabilizaron 18 años húmedos y 32 años secos, representando los años húmedos un 36% en ese intervalo de tiempo, mientras que en el periodo 2000-2022 se contabilizaron 17 años húmedos y 6 años secos, representando los años húmedos un 74%, por lo que se puede decir que la evolución de la precipitación tiene una tendencia al alza en los últimos años.

De acuerdo con Aguilar y Ramírez (2021), en el periodo 1954-2017 la demanda de agua en el AMM ha aumentado en un 1600%, este incremento es proporcional al aumento de la población, tal como se muestra en la **Figura 12** con datos de población del INEGI (2023a) en el AMM.

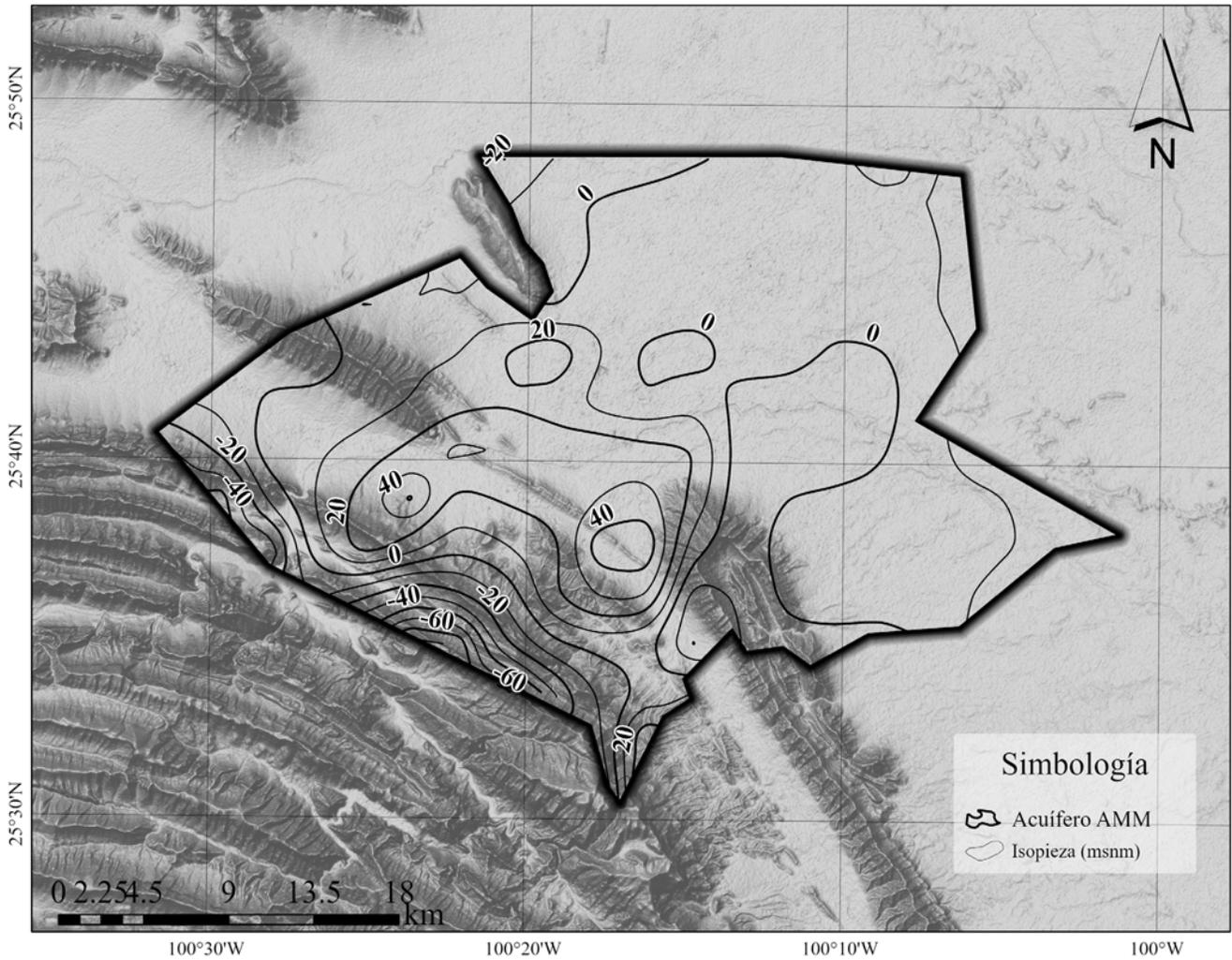
Aguilar y Ramírez (2021) indican que las fuentes superficiales representan el 62% del abastecimiento de agua para el AMM, siendo el 38% proveniente de fuentes subterráneas. Realizando una proyección, se puede estimar que para el año 2040 se esperaría que el AMM tenga una población de cerca de 6 millones

de habitantes (**Figura 13**), correspondiéndole una demanda de 16,000 l/s.

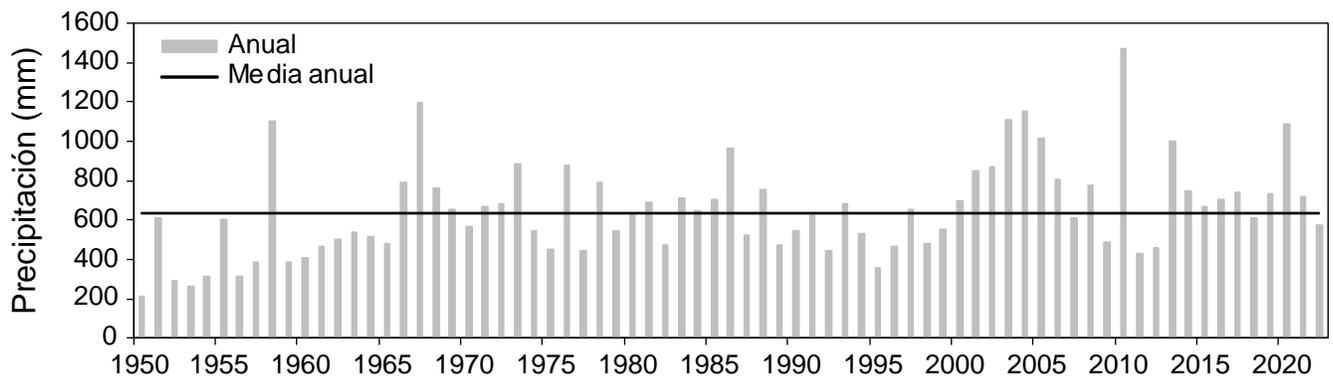
#### Conclusiones

Mediante el modelo superficial se determinaron las series de recarga al acuífero, alimentando el modelo subterráneo y obteniendo los niveles piezométricos en el periodo 1994-2022. Los resultados de los modelos hidrológicos fueron los esperados. Sin embargo, la eficiencia de estos depende principalmente de la disponibilidad de información en cantidad y en calidad, por lo que, es necesario refinar los modelos introduciendo información más detallada de las condiciones de la zona de estudio a fin de lograr simulaciones que representen mejor la realidad.

Basado en los resultados obtenidos, la evidencia indica que el posible causante de la carencia de agua durante el año 2022 en el AMM es la gran demanda de agua, producto del aumento de la población. Desde hace años se observa que el acuífero no tiene la capacidad de suplir la creciente



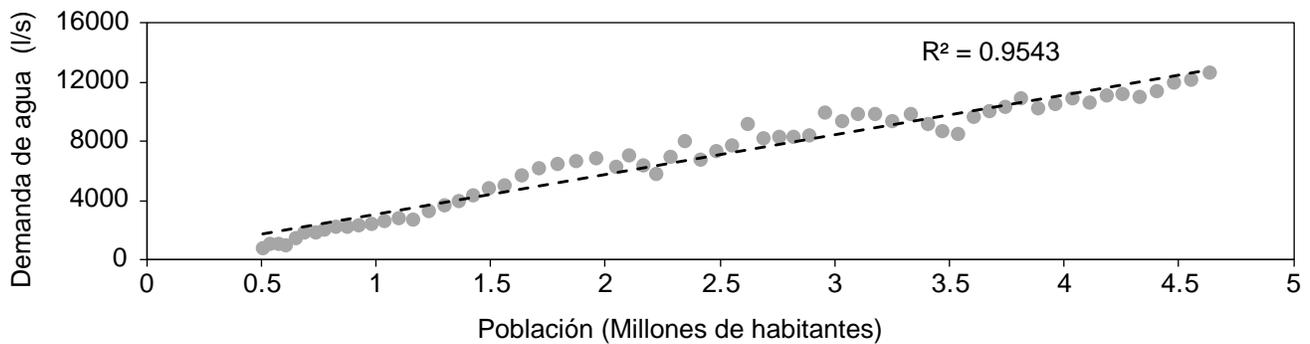
**Figura 10.** Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero del AMM en el periodo 1994-2022.



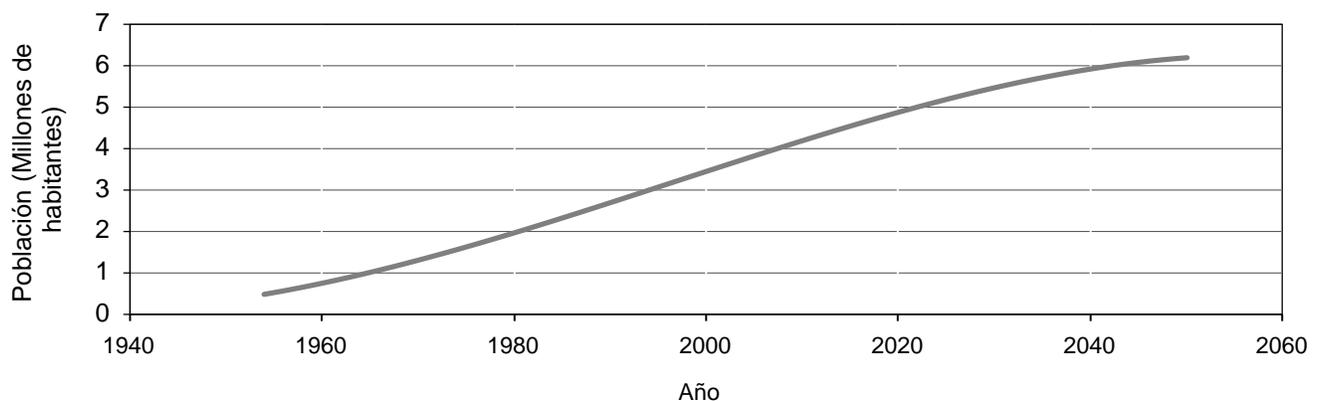
**Figura 11.** Serie histórica de precipitación anual.

demanda, siendo las fuentes superficiales las que están sometidas a un mayor estrés hídrico debido a que el abastecimiento depende en mayor medida de estas. Aunado a las proyecciones de demanda,

el panorama no es muy favorable, a menos que se implementen medidas que ayuden a reducir el consumo de agua y que aumenten la eficiencia de los sistemas de abastecimiento.



**Figura 12.** Correlación de la demanda de agua ante el crecimiento de la población en el AMM



**Figura 13.** Población proyectada en el AMM.

## Referencias

Aguilar Barajas I, Ramírez Orozco AI (2021). Agua para Monterrey: logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México. 2a edn. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León.

Anderson RL (1942). Distribution of the serial correlation coefficient. *The Annals of Mathematical Statistics* 13(1):1-13. doi:10.1214/aoms/1177731638.

Barrios A, Trincado G, Garreaud R (2018). Alternative approaches for estimating missing climate data: application to monthly precipitation records in South-Central Chile. *Forest Ecosystems* 10:1-10. doi:10.1186/s40663-018-0147-x.

Bergström S (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments (Utveckling och tillämpning av en begreppsmässig avrinningsmodell för Skandinaviska nederbördsområden (swe)). RHO, Hydrologi och Oceanografi.

Blyth S (1994). Karl Pearson and the Correlation Curve. *International Statistical Review* 62(3):393-403. doi:10.2307/1403769.

Cedillo LL (2012). Evaluación de las fuentes abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de Monterrey. MSc thesis, *Tecnológico de Monterrey*, p 167.

Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, p 597.

CONAGUA (2020). “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Área Metropolitana de Monterrey (1906), Estado de Nuevo León”, [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/nleon/DR\\_1906.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/nleon/DR_1906.pdf), [consultado el 18 de junio de 2022].

Deka RL, Mahanta C, Nath KK, Dutta MK (2016). Spatio-temporal variability of rainfall regime in the Brahmaputra valley of North East India. *Theoretical and Applied Climatology* 1186:793–806. doi:10.1007/s00704-015-1452-8.

Doorembos J (1976). Agro-meteorological field stations. *Irrigation and Drainage Paper No. 27*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Galván SM (2013). Estudio de prospección geohidrológica mediante métodos geológico-geofísicos para la prospección de agua subterránea en la huerta Santa Catarina, municipio

de Linares, Nuevo León, México. MSc thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, p 81. No incluye sección de anexos o material complementario.

Iglesias A (1984). “Hidrogeología” LI González de Vallejo M Ferrer Gijón L Ortuño Abad, and C. Oteo Mazo, *Ingeniería Geológica*, Madrid, Prentice Hall, 2002, p 38.

Kishore P, Jyothi S, Basha G, Rao SVB, Rajeevan M, Velicogna I, Sutterley TC (2016). Precipitation climatology over India: validation with observations and reanalysis datasets and spatial trends. *Climate Dynamics* 46(1):541-556. doi:10.1007/s00382-015-2597-y

Martínez Alfaro PE, Castaño Castaño S, Martínez Santos P (2006). Fundamentos de Hidrogeología. *Mundi-Prensa*, p 270.

Mather JR (1975). Estimation of areal average precipitation using different network densities and averaging techniques. *Publications in climatology* 58:53–54.

Murillo ME (1986). Estudio hidrogeoquímico del área metropolitana de Monterrey, N.L.: MSc thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, p. 71. Incluye sección de anexos con seis mapas y tablas complementarias.

Nash JE, Sutcliffe JV (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles.

*Journal of Hydrology* 10(3):282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6

Salinas JC (2015). Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como recurso alternativo. MSc thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, p. 66. Incluye sección de anexos con ilustraciones y tablas complementarias.

Sánchez FJ (2017). Hidrología Superficial y Subterránea: *Createspace Independent Pub*, p 391.

Siegel S, and Castellan NJ (1988). Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences: *McGraw-Hill*, p 312.

Oudin L, Andréassian V, Mathevet T, Perrin C, Michel C (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resour. Res.* 42(7):W07410. doi:10.1029/2005WR004636.

Wilm HG, Thornthwaite CW, Colman EA, Cummings NW, Croft AR, Gisborne HT, Harding ST, Hendrickson AH, Hoover MD, Houk IE, Kittredge J, Lee CH, Rossby C-G., Saville T, Taylor CA (1944) Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943–44. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25(5):683-693. doi:10.1029/TR025i005p00683



# Identificación de zonas de riesgo por inundación en la Ciudad de Morelia, Michoacán, y propuesta de un sistema de monitoreo a través de estaciones meteorológicas

## Identification of flood risk areas in the City of Morelia, Michoacán, and proposal for a monitoring system through meteorological stations

Israel García Ledesma<sup>1</sup>, Sonia Tatiana Sánchez Quispe<sup>1</sup>, Jesús Pardo Loaiza\*<sup>1</sup>, Constantino Domínguez Sánchez<sup>1</sup>

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

### Historial

Manuscrito recibido: 19 de enero de 2024  
Manuscrito aceptado: 22 de agosto de 2024  
Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Jesús Pardo Loaiza  
e-mail: [jesus.pardo@umich.mx](mailto:jesus.pardo@umich.mx)  
ORCID: 0000-0001-6473-8598

### Resumen

El propósito de este trabajo es definir las zonas propensas a inundaciones en la Ciudad de Morelia, para diseñar una red de monitoreo de precipitación que advierta a la población en riesgo de inundación. Para ello, se recopiló información histórica sobre inundaciones previas que han impactado la Ciudad, para identificar las áreas más afectadas y, en consecuencia, delimitar su área de influencia. Esto condujo a la identificación de las ubicaciones estratégicas para la instalación de estaciones de monitoreo. Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) desempeñan un papel esencial en la mitigación del riesgo de inundaciones, permitiendo a la población protegerse ante tales eventos, reduciendo de manera significativa sus efectos adversos.

**Palabras clave:** Inundaciones, monitoreo de precipitación, riesgo social, sistemas de alerta temprana.

### Introducción

Las inundaciones son uno de los fenómenos meteorológicos que dominan la lista de catástrofes tanto en términos de pérdidas humanas como económicas, según un análisis de la Organización Meteorológica Mundial (ONU-Hábitat, 2022). Esto derivado de la recurrencia con la que se presentan y el aumento de la población, lo que genera asentamientos en zonas con riesgo de inundación, aunado a la consecuente insuficiencia que tienen las estructuras de drenaje en la mayoría de las ciudades del mundo. Los sistemas de drenaje deficientes de baja capacidad de almacenamiento y el crecimiento e infiltración du-

### Abstract

The aim of this study is to delineate flood-prone areas in the City of Morelia, in order to devise a precipitation monitoring network that forewarns the flood-vulnerable population. Towards this goal, historical data on previous floods were compiled to identify the most affected zones within the city and consequently define their sphere of influence. This process led to the pinpointing of strategic locations for the installation of monitoring stations. Early Warning Systems (EWS) play a crucial role in flood risk mitigation, enabling the population to shield themselves against such events and significantly mitigate their adverse effects.

**Keywords:** Floods, rainfall monitoring, social risk, early warning systems.

rante las tormentas, la falta de mantenimiento y el crecimiento urbano heterogéneo son las principales causas de las inundaciones en zonas urbanas (Eini *et al.*, 2020). De acuerdo con Benito *et al.* (2021) existe un amplio consenso científico de que el cambio climático producirá variaciones en las inundaciones, con lo que la infraestructura existente no podría cumplir adecuadamente con la función para la que fue diseñada (Peck *et al.*, 2014).

Por lo general, las lluvias extraordinarias son la principal causa de inundaciones, lo que pone en peligro vida y bienes materiales (Alarcón Neva *et al.*, 2020); las Inundaciones Repentinas Urbanas

(IRU) se distinguen por tener una escala de tiempo inferior a 6 horas entre la precipitación y el inicio de la inundación. Las IRU han despertado un gran interés en la comunidad científica ya que, en comparación con los territorios rurales, las zonas urbanas tienen elementos expuestos de mucho mayor valor (Galuppini *et al.*, 2020).

Desde su fundación, la Ciudad de Morelia ha sufrido diversos episodios de inundación, ya que las condiciones topográficas e hidrográficas de la región, constituyen elementos que incrementan su vulnerabilidad (Bernal, 2015). En esta urbe se han presentado múltiples inundaciones, ocasionando pérdidas económicas y de infraestructura (CONAGUA, 2016).

Morelia, en su calidad de capital del estado de Michoacán, representa la principal concentración urbana de la entidad, misma que ha sufrido a lo largo de su historia diferentes procesos en la conformación territorial y crecimiento poblacional (Hernández Guerrero y Vieyra, 2014). Pese a ser vulnerable a inundaciones, la respuesta por parte de las autoridades para mitigar los efectos de este fenómeno es insuficiente, o simplemente, no existen los elementos necesarios para gestionar el riesgo que dichos fenómenos ambientales representan, haciendo que se perciban como catástrofes por los daños que causan, en ocasiones irreversibles, particularmente en las áreas cercanas a ríos y arroyos (Alarcón Neva, 2018).

De acuerdo con Bernal-Trejo (2018), los costos de la solución integral de los daños durante los temporales de lluvia en la ciudad de Morelia ascienden a alrededor de 40 millones de dólares debido a las inundaciones, de los cuales sólo se disponen de 250,000 dólares para mitigar sus consecuencias. En los últimos años, los costos se han incrementado debido al creciente aumento de damnificados, por lo cual es de suma importancia realizar trabajos que minimicen estas pérdidas.

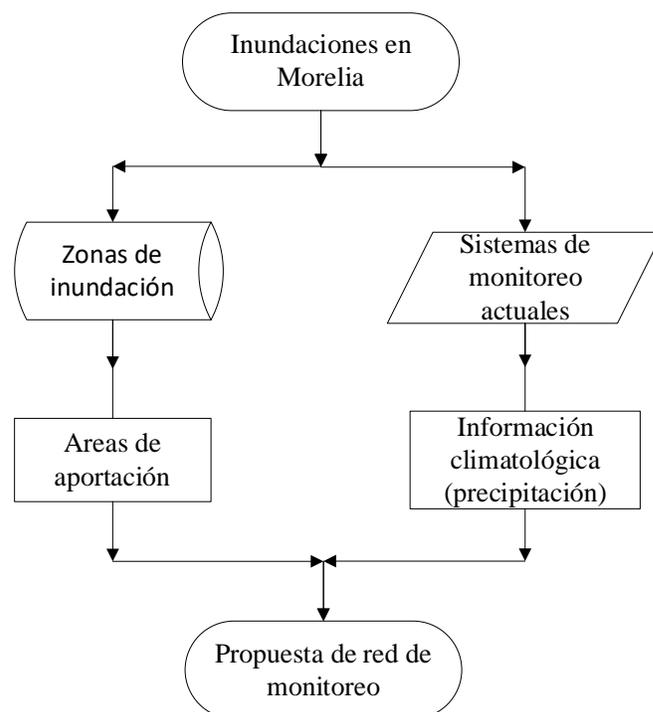
La presente investigación tiene como objetivo identificar las zonas de inundación existentes en la zona urbana de la Ciudad de Morelia, con la finalidad de proponer estaciones climatológicas de monitoreo en puntos estratégicas que permitan advertir a la población vulnerable a los eventos de

inundación que continuamente afectan a la ciudad, y con ello reducir las pérdidas económicas y sociales subsiguientes.

## Materiales y métodos

La delimitación y caracterización de las zonas de inundación que se encuentran dentro del espacio urbano de la Ciudad constituye la primera etapa en la definición de un plan de acción en la prevención y gestión de las inundaciones. El presente trabajo consta de dos estrategias para cumplir los objetivos planteados; la primera consistió en delimitar y caracterizar las zonas de inundación históricamente afectadas. La cuantificación de los daños permite establecer los sitios más propensos para priorizar acciones futuras. Otro aspecto importante en la prevención y gestión de las inundaciones es el monitoreo de la precipitación; para ello, se lleva a cabo la búsqueda de las estaciones climatológicas existentes en la ciudad y la delimitación de la zona de influencia que tiene cada una de ellas, con la finalidad de identificar las zonas que requieren monitoreo localizado (**Figura 1**).

Para la delimitación de las zonas de inundación,



**Figura 1.** Diagrama metodológico

se documentaron las inundaciones con mayor riesgo que ha sufrido la ciudad de Morelia en el periodo histórico de 2010 a 2022, incluyendo aquellas que más pérdidas económicas generaron y en las que se activó el Plan de Auxilio a la Población Civil en Casos de Desastre denominado (Plan DN-III).

Posteriormente, se realizó la delimitación de las zonas de aportación a las áreas inundadas, que se encuentran en espacios topográficamente más bajos.

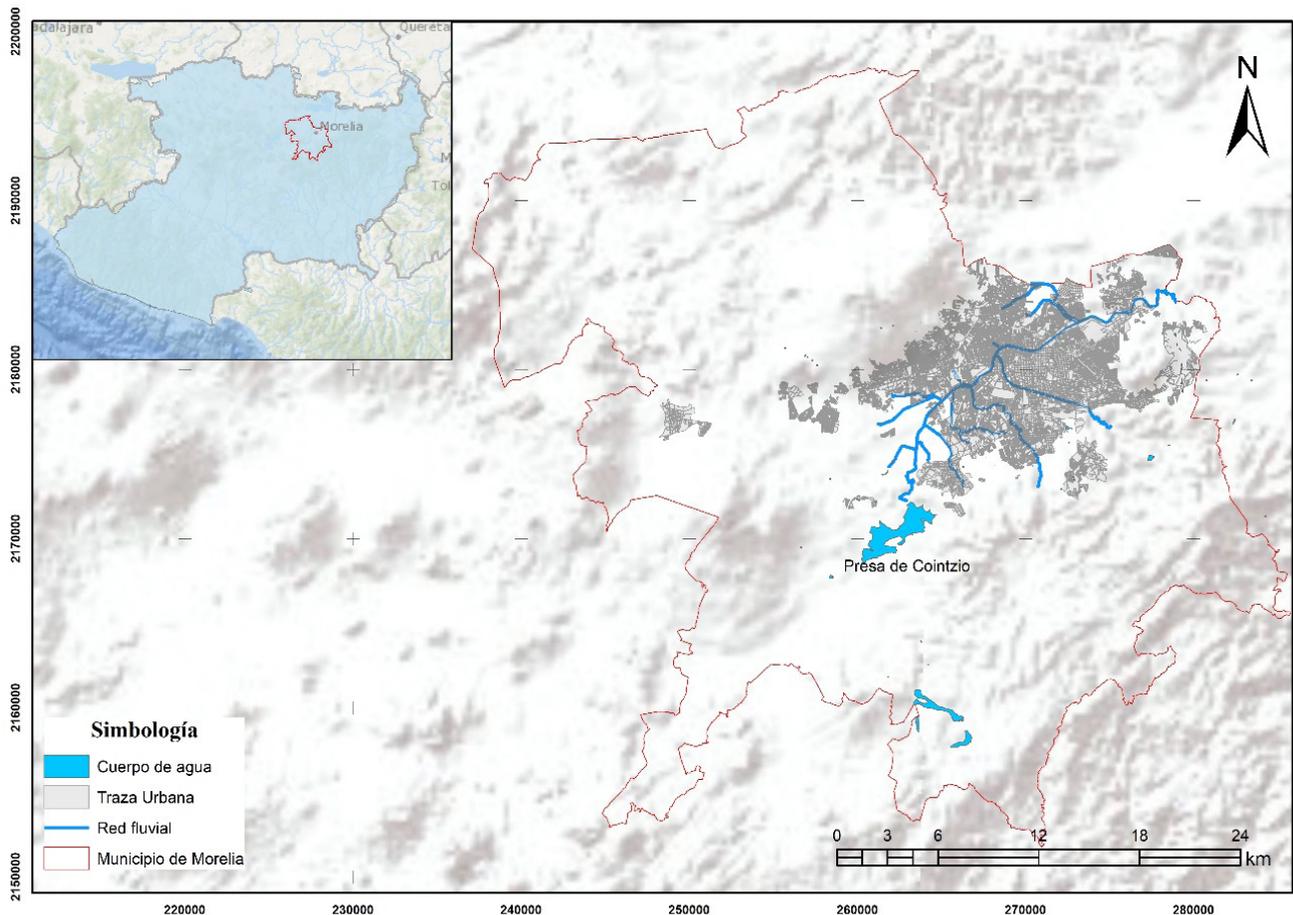
De forma paralela, se realizó la búsqueda de los sistemas de monitoreo meteorológico de uso libre que se tienen en Morelia, con la finalidad de establecer la zona de influencia de cada una de las estaciones meteorológicas y verificar si abarcan la zona de estudio y revisar la calidad y escala temporal (mensual, diaria, horaria, minutos) de los datos registrados. Finalmente, se realizó el análisis de las zonas de inundación, la distribución del monitoreo actual y la necesidad de actualizar o proponer un

nuevo sistema de monitoreo de la precipitación y evaluar las posibles consecuencias que esta genera de manera espacialmente distribuida.

## Resultados y discusión

### Caracterización de la zona de estudio

El Municipio de Morelia se localiza al norte del estado de Michoacán, entre los paralelos  $19^{\circ}27'06''$  y  $19^{\circ}50'12''$  de latitud norte y los meridianos  $101^{\circ}01'43''$  y  $101^{\circ}30'32''$  de longitud oeste, a una altitud promedio de 1,920 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con una superficie de 119,349.7 hectáreas, representando el 2% del territorio estatal (**Figura 2**). El 18% de la población del estado de Michoacán habita en este municipio (849,053 habitantes de acuerdo con el censo de Población y Vivienda de 2020), principalmente en la Ciudad de Morelia, que es el área urbana de mayor extensión y población en el estado. Colinda con 14



**Figura 2.** Localización de la zona de estudio.

municipios: al norte con Tarímbaro, Chucándiro, Copándaro y Huaniqueo; al este con Charo; al sureste con Tzitzio; al sur con Madero y Acuitzio; al suroeste con Huiramba y Pátzcuaro, y al oeste con Lagunillas, Tzintzuntzan, Quiroga y Coeneo (INEGI, 2020). Por su parte, la precipitación pluvial se presenta principalmente durante el temporal de lluvias (mayo a octubre), con una media anual de 780 mm (Hernández Guerrero y Vieyra, 2010).

### Historia de las inundaciones

En primer lugar, se realizó una investigación de las principales inundaciones que han afectado a la ciudad de Morelia en el periodo de 2010 a 2022, para determinar las zonas de inundación recurrentes (**Figura 3**).

Evidentemente la lista se puede incrementar, ya que la recurrencia de eventos de inundación en la Ciudad es muy grande y se observa un claro crecimiento tanto en la recurrencia de las inundaciones como en la afectación que estas generan. En la **Figura 4** se aprecia que existen zonas recurrentes de inundación, las cuales tienen diferentes orígenes.

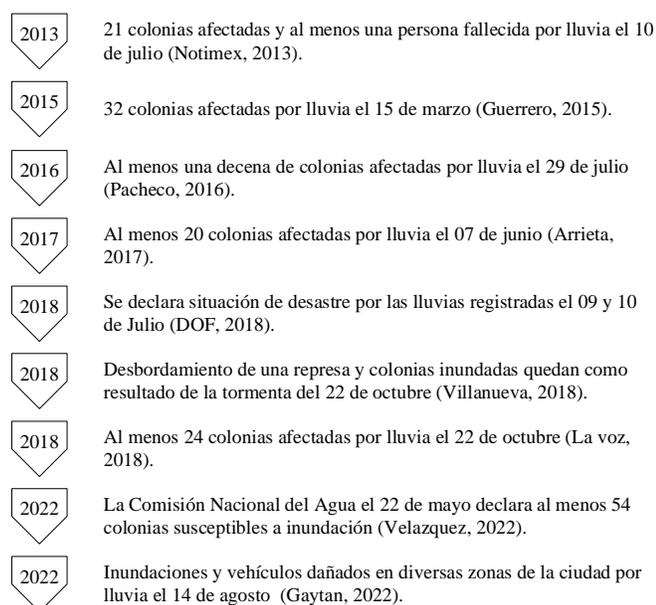
Tomando en cuenta lo anterior, en Morelia se tienen inundaciones identificadas por los drenajes sobrecargados derivado de lluvias intensas en sitios localizados y por desbordamiento de ríos. Se observa qué, en lo referente al desbordamiento de

los ríos, se requieren estaciones de monitoreo que midan en tiempo real lo que ocurre en la parte alta de la cuenca, ya que el escurrimiento que se genera ocasiona el desbordamiento de los drenes aguas abajo, mientras que en la parte urbana se requiere un análisis espacial de la zona de aportación en cada uno de los sitios vulnerables a inundación. Como se puede ver en la **Figura 5**, se requiere una red de monitoreo que permita alertar a la población en riesgo, ya que las inundaciones generadas en la Ciudad demandan un tiempo de respuesta muy rápido debido a que en su mayoría son zonas de nula infiltración, lo que genera una mayor velocidad en los escurrimientos generados.

### Sistemas de información meteorológica en Morelia

Los sistemas de alerta son la medida preventiva no estructural por excelencia; ya que, permiten a la población reaccionar de manera anticipada ante una inundación resguardando su salud y los bienes que se encuentren expuestos. Una red de monitoreo espacialmente distribuida dentro de la zona urbana de la Ciudad que sea de acceso público, permite tener una delimitación más fina a las zonas vulnerables a inundación, teniendo en consideración la traza urbana de la ciudad y el posible crecimiento de la mancha urbana; con ello, es posible reducir las pérdidas ocasionadas por una inundación.

Actualmente, Morelia cuenta con una estación climatológica por parte la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM, la cual realiza mediciones cada minuto. También se cuenta con una estación automática del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), la cual realiza mediciones a cada hora y una estación de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS). Sin embargo, la información de estas últimas dos no es de acceso directo al público y se debe solicitar la información directamente en la dependencia, por lo que para fines de esta investigación no son funcionales. Por otra parte, del mismo SMN se tiene una estación dentro de la Ciudad, la cual realiza mediciones de precipitación total por día; sin embargo, esta información no se encuentra actualizada ya que se tienen datos hasta el 2015; por lo que, para fines



**Figura 3.** Inundaciones históricas de la Ciudad de Morelia.

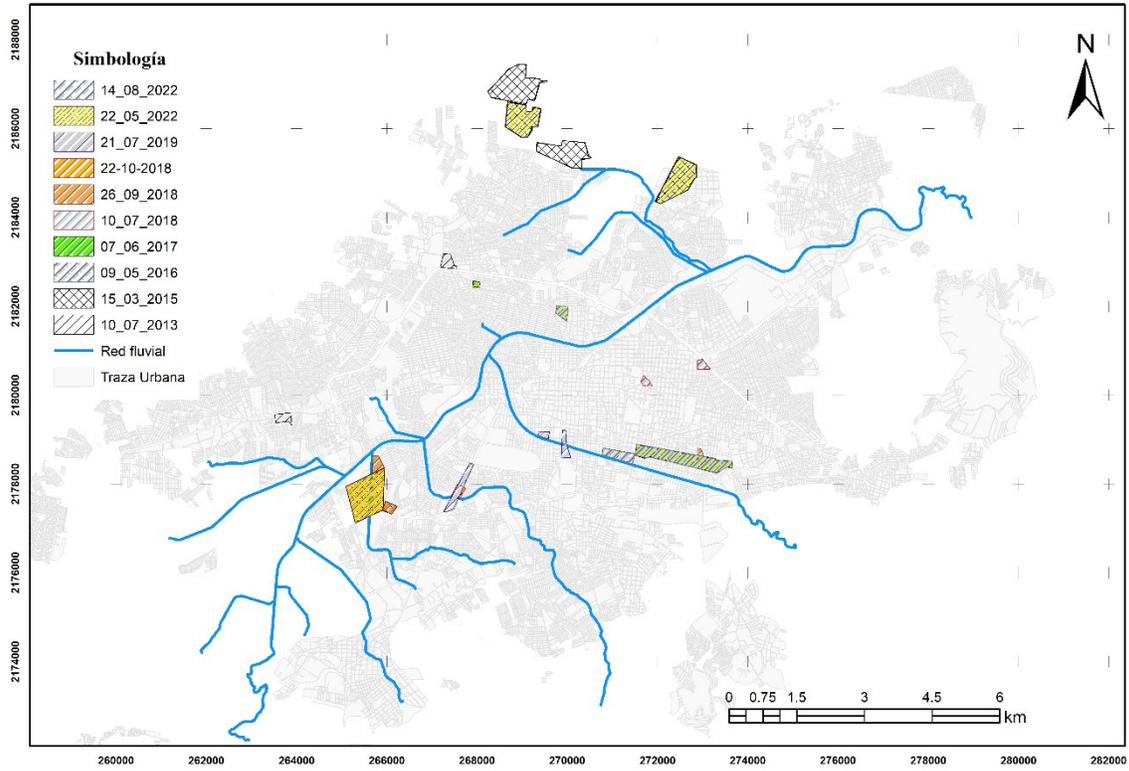


Figura 4. Ubicación espacial de las zonas de inundación en Morelia.

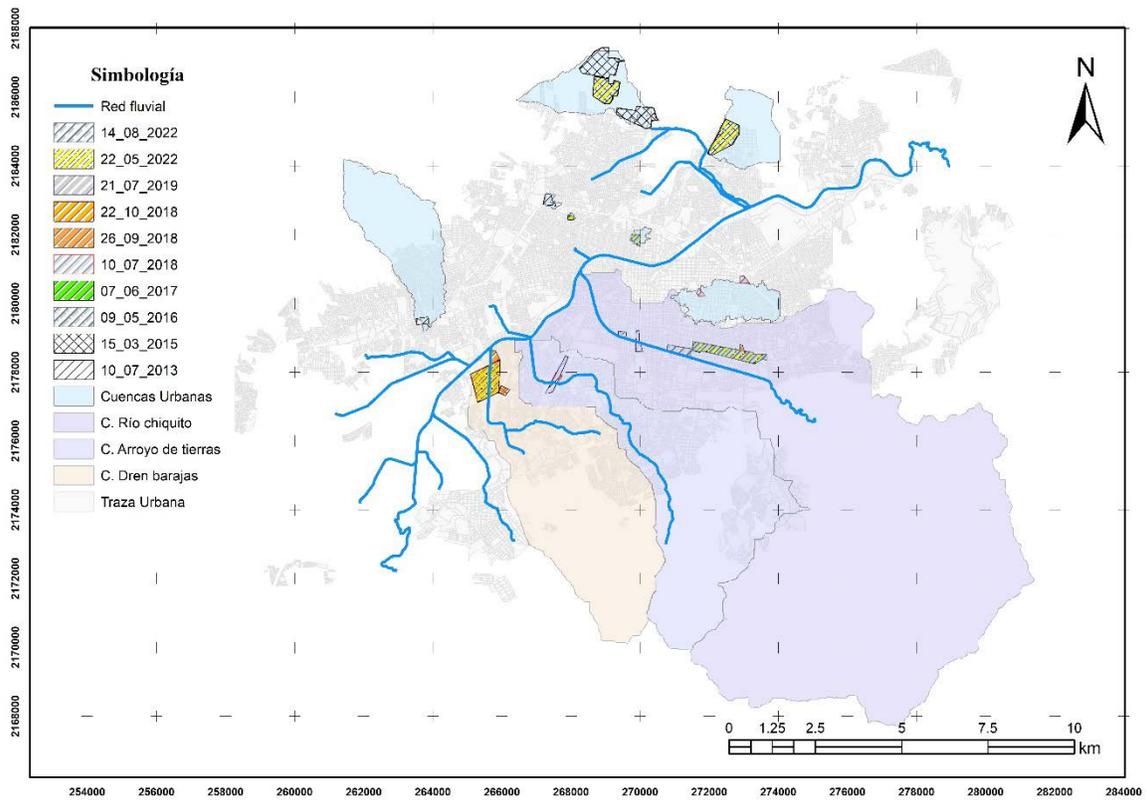
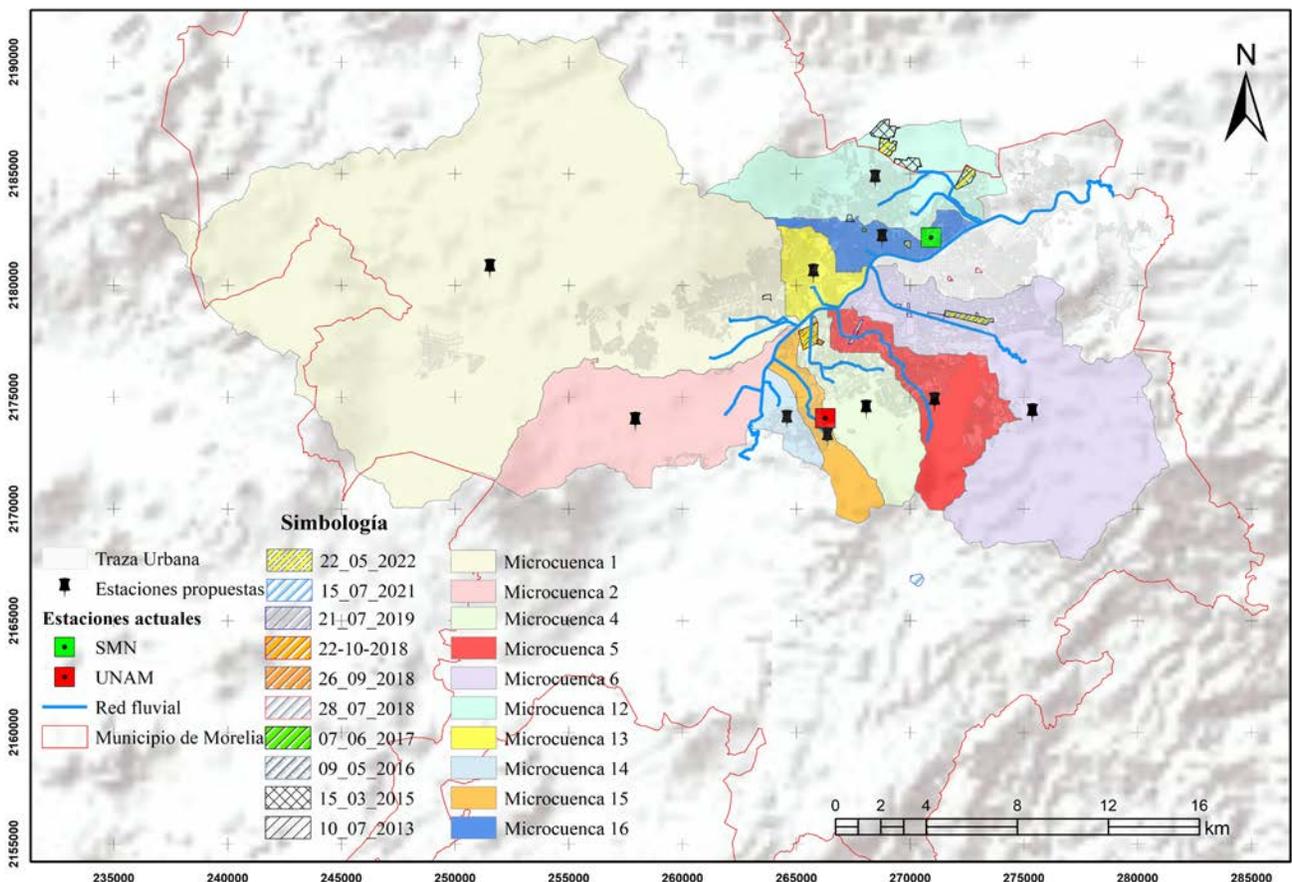


Figura 5. Cuencas de aportación en las zonas de inundación.

de alertar a la población no es aplicable.

El Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS), cuenta con una red de 9 estaciones climatológicas en Morelia; no obstante, la ubicación espacial de las mismas no está disponible y la información que toma a cada minuto no es almacenada en ninguna base de datos. Debido a esto, la información de las estaciones que conforman esta red no es del todo accesible para la ciudadanía, ya que no se encuentra disponible la ubicación de estas. Por lo tanto, actualmente en la ciudad se dispone de una estación meteorológica con medición a cada minuto de acceso público que puede servir de alerta a la población y es la estación que forma parte de RUOA (**Figura 6**). De acuerdo con esta información, es evidente que se requiere trabajar en un sistema de monitoreo funcional y de acceso público que sirva para alertar a la población que se localiza en zonas susceptibles a inundación.

En el presente trabajo se propone la instalación de estaciones meteorológicas de bajo costo, como lo sostiene Rodríguez-Licea (2020), las cuales registran precipitación en tiempo real y se comunican vía wifi compartiendo la información en la página [saih.umich.mx](http://saih.umich.mx). La ubicación propuesta de las estaciones que integren la red de monitoreo estará, en el centroide de cada una de las microcuencas principales de la ciudad (**Figura 6**), con el propósito de tener al menos un sitio de monitoreo por microcuenca y poder analizar de manera aislada lo que ocurre en cada una de ellas. Con esto se podrá alertar a la población que se ubique en zonas de riesgo y posteriormente se puedan proponer medidas estructurales que ayuden a mitigar los efectos adversos que generan las inundaciones. Las estaciones propuestas tendrían una red de comunicación local basada en ondas de radio, lo cual reduce el error en la comunicación de la información, brindando información en tiempo real sobre la evolución de la tormenta.



**Figura 6.** Ubicación de las estaciones meteorológicas existentes y propuestas.

Actualmente, la ubicación de las estaciones meteorológicas no se encuentra disponible debido a que las páginas se encuentran fuera de servicio (saih) o como el caso del OOAPAS, no comparte la ubicación geográfica de estas, solo el nombre de la estación y el registro, únicamente se cuenta con la ubicación espacial de las estaciones de la UNAM y el SMN.

## Conclusiones

Las inundaciones que se presentan en la Ciudad de Morelia tienen patrones de recurrencia en sitios puntuales, es por ello que surge la necesidad de aplicar medidas de mitigación que permitan disminuir las pérdidas generadas año con año. Debido al costo elevado que presentan las medidas de mitigación de tipo estructural, la implementación de medidas no estructurales como los sistemas de alerta son indispensables para disminuir los efectos adversos en la sociedad.

El sistema de monitoreo propuesto en esta investigación cubre la mancha urbana de la Ciudad de Morelia; lo cual permitirá realizar la medición y el pronóstico anticipado de las posibles inundaciones que se generan por el incremento del volumen de escurrimiento por la precipitación, de esta manera la ciudadanía ubicada en zonas de riesgo podrá ser alertada antes de verse afectada para salvaguardar su integridad y su patrimonio.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial al Programa de Doctorado en Ingeniería Civil y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (CONAHCyT).

## Referencias

Alarcón Neva A (2018). Estimación de áreas vulnerables a inundaciones en zonas urbanas, caso: Morelia, Michoacán, México: MSc thesis, Colegio de Postgraduados.

Alarcón Neva A, Chávez Morales J, Palacios Vélez ÓL, Ibáñez Castillo LA (2024) Estimación de áreas vulnerables a inundaciones en zonas urbanas: Morelia, Michoacán, México. *Tecnología y ciencias del agua* 11(3):01-26. doi:10.24850/jtyca-2020-03-01

Benito G, Beneyto C, Aranda JÁ, Machado M, Francés F, Sánchez-Moya Y (2021). Inundaciones y cambio climático: certezas e incertidumbres en el camino a la adaptación. *Cuadernos de Geografía* 107:191-216. doi:10.7203/CGUV.107.21424

Bernal E (2015). La gestión de riesgos de inundación en la administración pública caso Morelia. 20° Encuentro Nacional Sobre Desarrollo Regional En México.

Bernal-Trejo EG (2018). La Gestión de Riesgos de Inundaciones en la Ciudad de Morelia, Michoacán 2016-2017: Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

CONAGUA (2016). Actualización del estudio para el control de avenidas en el sistema Río Grande-río Chiquito de la presa Cointzio a su desembocadura al lago de Cuitzeo.

Eini M, Kaboli HS, Rashidian M, Hedayat H (2020). Hazard and vulnerability in urban flood risk mapping: Machine learning techniques and considering the role of urban districts. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 50:101687. doi:10.1016/j.ijdrr.2020.101687

Galuppini G, Quintilliani C, Arosio M, Barbero G, Ghilardi P, Manenti S, Petaccia G, Todeschini S, Ciapponi C, Martina MLV, Creaco E (2020). A unified framework for the assessment of multiple source urban flash flood hazard: the case study of Monza, Italy. *Urban Water Journal* 17(1):65–77. doi:10.1080/1573062X.2020.1734950

Hernández Guerrero JA, Vieyra A (2014). Precariedad Habitacional en el peri-urbano de la ciudad de Morelia, Michoacán: riesgos de desastre por inundaciones. En Vieyra A, Larrazábal A (eds.) *Urbanización, sociedad y ambiente: experiencias en ciudades medias*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), pp 271-293.

Hernández Guerrero JA, Vieyra A (2010). Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana: ¿El desastre nace o se hace? *Revista de Geografía Norte Grande* 47:45–62. doi:10.4067/S0718-34022010000300003

INEGI (2020). Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020.

ONU-Hábitat (2022). El Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-elcambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>

Paquier A, Bazin PH, El Kadi Abderrezzak K (2020). Sensitivity of 2D hydrodynamic modelling of urban floods to the forcing inputs: lessons from two field cases. *Urban Water Journal*

17(5):457-466. doi:10.1080/1573062X.2019.1669200

Peck AM, Bowering EA, Simonovic SP (2014). A flood risk assessment to municipal infrastructure due to changing climate part II: case study. *Urban Water Journal* 11(7):519-

531. doi:10.1080/1573062X.2013.781760

Rodríguez-Licea D (2020). Sistema Automático de información Hidrológica de Morelia. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



# Distribución y características de tierras campesinas en la microcuenca Atécuaro

## Distribution and characteristics of peasant lands in the Atécuaro micro-basin

María Alcalá De Jesús\*<sup>ORCID</sup>, Rogelio García Rangel, Juan Carlos González Cortés, Juan Carlos Montero Castro, María Elena Granados García.

Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### Historial

Manuscrito recibido: 7 de febrero de 2024

Manuscrito aceptado: 9 de junio de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

María Alcalá De Jesús

e-mail: tupuri12@yahoo.com.mx

ORCID: 0009-0004-9300-3557

### Resumen

La Etnoedafología estudia la percepción que tienen los campesinos sobre las propiedades, nomenclatura, taxonomía de los suelos o tierras y su manejo en la agricultura. Se realizó un mapa con seis tierras campesinas y se registró el saber tradicional sobre sus características: Charanda, Revuelta, Barrosa, Tepetate, Polvilla y Tepetatosá; se distribuyen en el área de pie de monte y planicie de la microcuenca Atécuaro. Presentan características únicas de cada clase de tierra, aunque pueden compartir algún atributo con las demás; tienen similitud en nomenclatura y características con tierras de otras regiones de Michoacán, excepto la Tepetatosá que no se ha registrado en el estado.

**Palabras clave:** Etnopedología, cartografía, conocimiento-local, sabiduría-campesina.

### Introducción

Los técnicos y los agricultores utilizan diferentes lenguajes para hablar sobre el mismo tema: *suelo* para los científicos y *tierra* para los agricultores (Ortiz y Gutiérrez, 2022). La Etnoedafología es una rama de las etnociencias que estudia la percepción que tienen los campesinos sobre las propiedades, nomenclatura, taxonomía de los suelos o tierras y su manejo en la agricultura, conocimiento de las sociedades rurales al que le daban poca importancia (Barrera-Bassols, 1988); sin embargo, se hace notar que la etnoedafología mexicana tiene 43 años de investigación y es hasta finales de la década de los años 1980's que la comunidad académica comenzó

### Abstract

Ethnoedaphology studies the perception that peasants have about the properties, nomenclature, taxonomy of soils or lands and their management in agriculture. A map was made of six peasant lands and traditional knowledge about their characteristics was recorded: Charanda, Revuelta, Barrosa, Tepetate, Polvilla and Tepetatosá; which are distributed in the foothills and plains of the Atécuaro micro-basin. These have unique characteristics of each land class, although may share some attributes with each other having similarities in nomenclature and characteristics with lands from other regions of Michoacán, except for Tepetatosá, which has not been recorded in the state.

**Keywords:** Ethnopedology, cartography, local-knowledge, peasant-wisdom.

a reconocer el conocimiento local, campesino o indígena (Ortiz y Gutiérrez, 2022).

Para los grupos étnicos mayas, otomíes y purépechas, entre otros, existen evidencias en la nomenclatura y clasificación de sus tierras, útiles en la actualidad para el hombre de campo; la clasificación existía antes de la llegada de los españoles (1500) y en comparación con el origen de la ciencia del suelo moderna (1880), la experiencia del conocimiento local se ha conservado casi cuatro siglos (Ortiz, 2019). Diversos grupos étnicos cuentan con el conocimiento local sobre el recurso suelo de forma ordenada y sistematizada con fines agrícolas y no agrícolas (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-

Castorena, 2001).

Los estudios etnoedafológicos son una herramienta útil mezclando el conocimiento de los productores con el científico, lo que ha permitido generar mapas de clases de tierras campesinas de alta calidad, baratos y sencillos, más precisos y exactos que los equivalentes a los mapas técnicos (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001; Ortiz y Gutiérrez, 2022). Además, el conocimiento local es importante para la caracterización, clasificación, uso, manejo y aprovechamiento de las tierras campesinas (Aguilar-Orea *et al.*, 2019). Cada grupo campesino tiene sus criterios para nombrar y clasificar a sus suelos, por ejemplo, la textura, pedregosidad, color, humedad, profundidad, consistencia, salinidad y productividad, entre otros (Barrera-Bassols, 1988). El conocimiento puede obtenerse a nivel de ejido con información vigente y de primera mano (Aguilar-Orea *et al.*, 2019); no obstante, también puede llevarse a cabo en donde los suelos sean utilizados de manera común y se tenga tradición en su manejo (Bautista, 2009).

En el país, la sabiduría heredada se mantiene en la mayoría de los grupos indígenas y campesinos y está relacionada de manera directa con las características ecológicas y con el uso de la tierra (Barrera-Bassols, 1988). El nombre de las clases de tierras además de ser un lenguaje, tienen un fin utilitario al relacionarse con los cultivos, laboreo, aplicación de abonos, métodos de recuperación, recomendaciones de manejo y control de arvenses, entre otros (Ortiz *et al.*, 1990; Ortiz, 2019).

Para realizar un estudio etnoedafológico, existe un método para hacer mapas de clases de tierras con el conocimiento local, campesino o indígena que consiste en: a) elaborar un mapa base a nivel parcelario con el apoyo de imágenes de satélite de alta resolución; b) seleccionar informantes clave, una o dos personas (ej. comisario ejidal, encargado de tenencia, propietarios de las tierras) que conozcan a la perfección el área que se desea estudiar, el número de informantes está en función del aporte de conocimiento nuevo, es decir, cuando la información se repite, las entrevistas terminan; c) recorrer el campo parcela por parcela en compañía de los informantes y preguntarles sobre

las características de las tierras y en dónde cambian (Ortiz *et al.*, 1990; Ortiz, 2019).

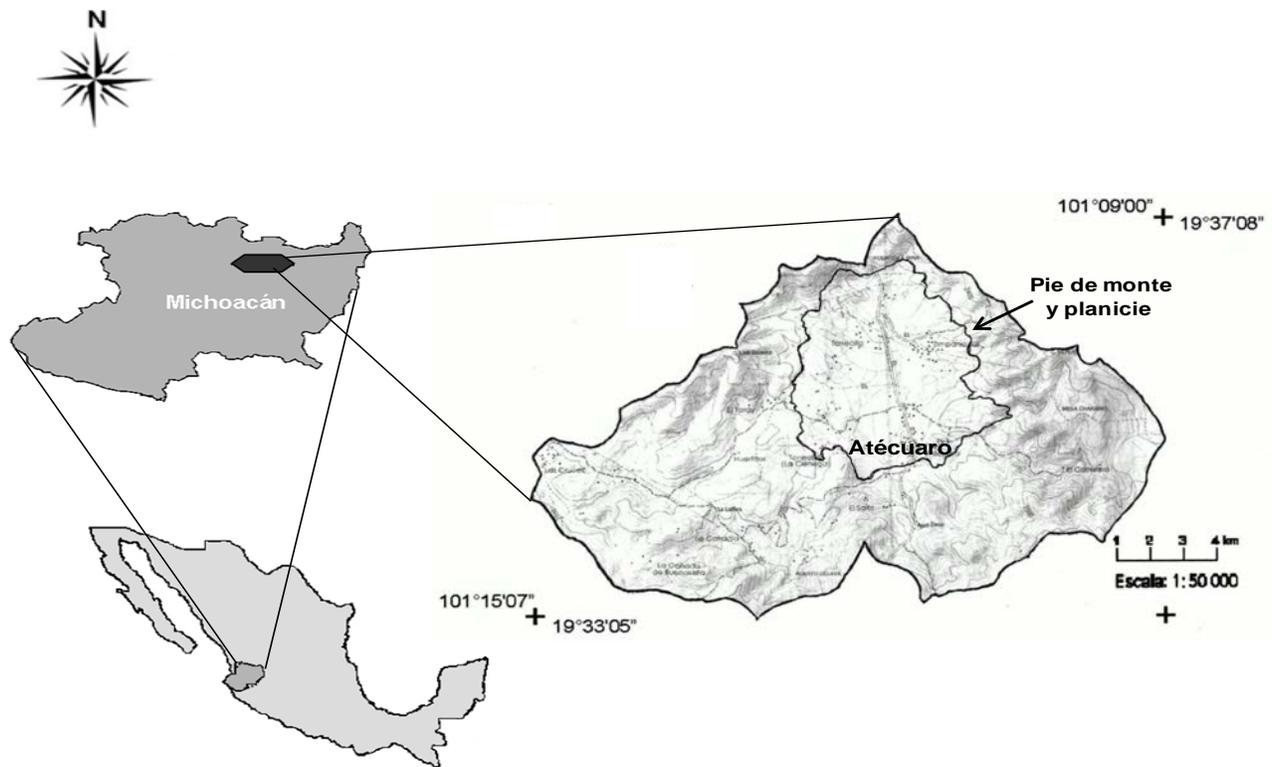
El conocimiento etnoedafológico en México cuenta con mapas en 60 ejidos de 23 estados (Ortiz y Gutiérrez, 2022). En México, existen 29, 519 ejidos (Morett-Sánchez y Cosío-Ruiz, 2017) de los cuales, 1751 se localizan en el estado de Michoacán (INEGI, 1997) en donde los estudios etnoedafológicos aún son escasos. Entre los estudios con los que se cuenta, destaca el de Barrera-Bassols (1988) cuya nomenclatura conserva el nombre original en purépecha; Maldonado *et al.* (2014) con la distribución y caracterización de tierras en la microcuenca El Calabozo; Bedolla-Ochoa *et al.* (2018) enfocado en las funciones ambientales y el de Bautista *et al.* (2019) en donde compara el conocimiento local con el técnico, los dos últimos, en la Reserva de la biosfera Zicuirán-Infiernillo. En el presente estudio se da a conocer la distribución y características de tierras campesinas en la microcuenca Atécuaro con base en el manual para la cartografía de clases de tierras campesinas propuesto por Ortiz *et al.* (1990) y Ortiz (2010; 2019).

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La tenencia Atécuaro, municipio de Morelia, Michoacán es conocida como microcuenca Atécuaro y se ubica a 11 km al sur de la capital. En esta microcuenca se localiza el área de estudio que corresponde a la superficie de Pie de monte y planicie. Atécuaro forma parte de la Subcuenca de Cointzio, perteneciente a la Cuenca del lago de Cuitzeo dentro de la región fisiográfica conocida como Sistema Volcánico Transversal (Morales, 2010) entre las coordenadas 19° 33' 05" y 19° 37' 08" N, 101° 09' 00" y 101° 15' 07" O a una altitud entre 2, 100 y 2, 600 m (Hernández-Madriral *et al.*, 2010) (**Figura 1**).

La microcuenca Atécuaro es reconocida como una caldera de composición andesítica con alteración al interior, así como depósitos aluviales (Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010). Su geomorfología está conformada al exterior por laderas inclinadas y escarpadas, y al interior, por la-



**Figura 1.** Localización del área de estudio (pie de monte y planicie) dentro de la microcuenca Atécuaro.

deras suaves a muy suaves, pie de monte y planicie (Mendoza y Bocco, 2010). El clima es templado sub-húmedo con lluvias en verano (Vidal, 2010). Los suelos son Acrisol y Luvisol, ácidos, fuertemente meteorizados y con acumulación de arcilla en el subsuelo; el Acrisol tiene saturación de bases menor de 50% y es pobre en nutrientes; el Andosol, es limoso, con alta capacidad de retención de humedad y susceptible a la erosión cuando se deforesta (Cabrera *et al.*, 2010).

### Distribución y caracterización de clases de tierras

El estudio etnoedafológico se llevó a cabo en el área de pie de monte y planicie de la microcuenca Atécuaro, elegida por tratarse de la zona de mayor actividad agrícola. Se utilizó la metodología propuesta por Ortiz *et al.* (1990) y Ortiz (2019) con el fin de obtener un mapa de clases de tierras de acuerdo con el conocimiento campesino. Con el apoyo de una imagen de satélite de alta resolución obtenida mediante la aplicación Google Earth Pro, se elaboró un mapa base delimitando el área de estudio

y las posibles clases de tierras, procedimiento que se llevó a cabo con apoyo de las características físicas de la imagen como el tono, textura y accidentes naturales.

En compañía del encargado de la tenencia y dos personas propietarias, se realizó un recorrido en el campo y se corroboraron los límites de las clases de tierras. Durante el recorrido, se entrevistó a los acompañantes para obtener información sobre el nombre, características de las tierras y su uso, tomando como referencia el cuestionario propuesto por Maldonado *et al.* (2014), además, se entrevistó a 45 campesinos que representan el 34.6% del total de los dueños de las tierras en el área de estudio. El mapa de tierras campesinas se digitalizó a escala 1:20,000 mediante el sistema de información geográfica Ilwis.

## Resultados y discusión

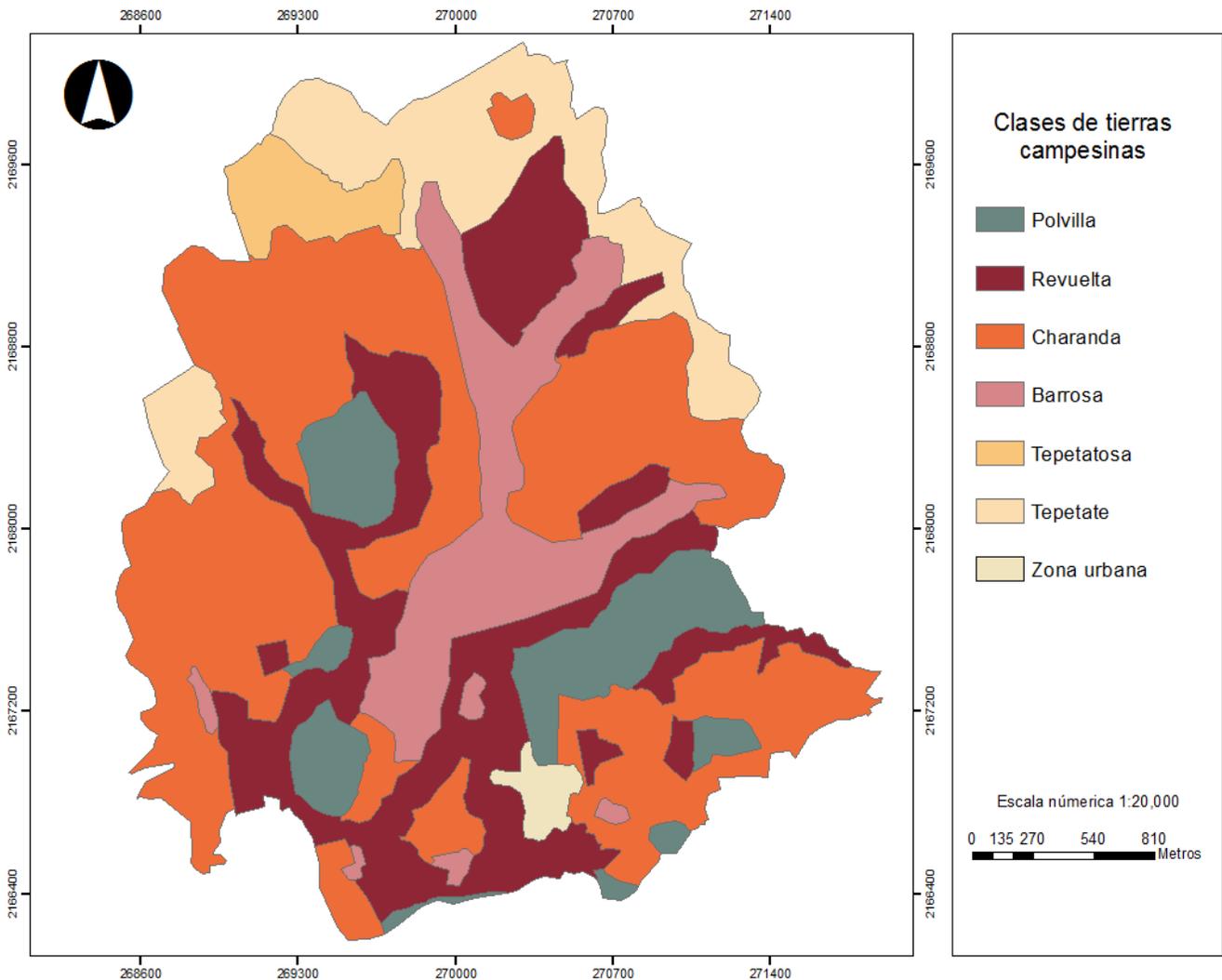
### Distribución de tierras

El área de estudio tiene una superficie 825.3 ha en donde se registraron seis clases de tierras campesi-

nas (**Figura 2**): tierra Charanda que es la de mayor superficie (42.8%), se encuentra de norte a sur en las áreas de menor altitud (2233 m). Tierra Revuelta (22.37%) en los pie de monte y mesetas; tierra Barrosa (12.06%) y tierra Tepetate (11.85%) en laderas de cerro de la parte norte y noreste, además, la tierra Barrosa se localiza en áreas de menor altitud y sin inclinación en donde hay obras de drenaje; la tierra Tepetate ocupa el segundo lugar entre las tierras de mayor altitud (2262 m); la tierra Polvilla (7.95%) se ubica en laderas de monte con vegetación de pino encino al oeste y sur de la microcuenca, y la tierra Tepetatosa, la menos abundante (2.97%) se distribuye en lomeríos al noroeste en las zonas más altas, al pie de monte de matorraleras y peñascos.

### Características de las tierras

Los agricultores de la microcuenca Atécuaro reconocen a sus tierras mediante las siguientes características físicas: *humedad*, atributo que les permite identificar a las tierras que retienen agua; *color*, les es útil para distinguir los límites entre las tierras; la consistencia para determinar *dureza* o dificultad para destruir los terrones secos o si la tierra es *lodosa* y *chiclosa* cuando está mojada; *textura*, para expresar si se forman grietas cuando la tierra está seca y si es pegajosa cuando está húmeda, y el *uso*. Estas características se ordenan en correspondencia con el lenguaje técnico (**Tabla 1**) tomando como referencia el arreglo de la información que se reporta para el Ejido de San



**Figura 2.** Distribución de clases de tierras campesinas en el área de pie de monte y planicie en la microcuenca Atécuaro. Mpio. de Morelia, Mich.

Salvador Atenco, estado de México (Ortiz *et al.*, 1990; Ortiz, 2019).

**Tierra Charanda.** Se distingue por su resequeidad y formar terrones muy duros que se resquebrajan con facilidad, dando un aspecto arenoso. La vegetación que crece en esta tierra es de herbáceas, pastizales, matorrales, pino chino y encino. Esta clase de tierra es semejante en humedad, color, dureza y textura con la Charanda reportada en la Reserva ecológica de Infiernillo en Michoacán en áreas agrícolas, de pastoreo y vegetación secundaria de clima cálido subhúmedo (Bautista *et al.*, 2019; Bedolla-Ochoa *et al.*, 2018); además, comparte la formación de grietas y el resquebrajamiento con la Charanda de la zona agrícola de la microcuenca El Calabozo también en Michoacán (Maldonado, 2014), quien menciona que estas últimas características influyen en el deslave de la tierra por efecto del agua de lluvia cuando están desprotegidas de vegetación. La pegajosidad es similar con la Charanda de las *Echéri charanda* en zonas de clima templado de encino, matorral subtropical y laderas bajas de las sierras volcánicas de la región Purhépecha (Barrera-Bassols, 1988).

**Tierra Revuelta.** Esta clase de tierra es menos dura y menos pegajosa que la Charanda; la consideran como producto de los azolves o depósitos de

las tierras que provienen de las zonas altas de la microcuenca; si la tierra se encuentra entre los pie de monte de pino-encino y las planicies, guardan poca humedad y es muy dura en la temporada de secas, y si los azolves provienen de las mesetas, lomeríos y pie de monte en donde la vegetación es matorral, la tierra Revuelta es menos oscura, menos fértil y más dura que las de pie de monte de pino-encino; cuando la tierra es pedregosa, proviene de azolves o arrastre de las tierras Charanda, Tepetate y Tepetatosa que son más pedregosas tanto en la superficie como al interior. Las características físicas de la tierra Revuelta son similares a las reportadas por Maldonado *et al.* (2014) quien menciona que esta tierra es una mezcla de la Polvilla con la Charanda.

**Tierra Barrosa.** En temporada de lluvias el agua se estanca en esta tierra, se anega y permanece así todo el año, por este motivo es conocida como *sobrado o ciénega*; cuando la tierra logra secarse no guarda humedad y se agrieta. En algunas áreas, el uso de la tierra se limita al pastoreo y en otras, a la agricultura. La vegetación que soportan se compone de grama, lirio, sauce, jara y fresno que en ocasiones es rechazada por el ganado. Una característica importante de esta tierra, es el estancamiento de agua; es semejante a la Barrosa en áreas de ganadería, de bosque y selva baja caducifolia de clima cálido

**Tabla 1.** Características físicas de las tierras campesinas en la microcuenca Atécuaro.

Clase de Tierra	Retención de humedad	Color	Consistencia		Textura	Uso
			Seco	Mojado		
Charanda	No guarda humedad; se encharca	Rojiza	Dura	Lodosa, lisa chiclosa	Pegajosa, se agrieta	Agrícola, maíz
Revuelta	Guarda poca humedad	Café	Dura	Lodosa y suave	Poco pegajosa, se agrieta poco	Agrícola, maíz
Barrosa	Guarda humedad; se enfanga	Gris-pardo	Dura	Lodosa, lisa chiclosa	Pegajosa, se agrieta	Pastoreo Agrícola, maíz
Tepetate	No guarda humedad	Amarillenta	Dura y resquebrajable	Dura y resquebrajable	Arenosa, pedregosa	Pastoreo
Polvilla	Guarda humedad	Café oscuro a café claro	Polvosa	Suave	No se pega, No hace grietas	Agrícola, maíz
Tepetatosa	No guarda humedad	Café a café amarillenta	Dura	Lodosa	Pedregosa (piedras pequeñas)	Agrícola, maíz

subhúmedo (Bautista *et al.*, 2019; Bedolla-Ochoa *et al.*, 2018) y con las *Echéri querekuá* en zonas de clima templado y de ciénega de la región Purhépecha (Barrera-Bassols, 1988).

**Tierra Tepetate.** Por lo general, esta tierra es delgada, la conocen como tierra *encuerada* o *deslavada* y es *pobre* porque es infértil, sin embargo, hay espacios en donde aunque la tierra tiene capas delgadas (20 cm de espesor) el suelo es fértil, pero en otras zonas, solo hay cascajo. La vegetación que soporta esta tierra es grama, matorral, jaras y en algunos espacios hay maguey y nopal; no se establecen cultivos y se aprovecha para el pastoreo. Las características físicas de esta tierra son parecidas a la tierra Tepetate de la microcuenca El Calabozo (Maldonado *et al.*, 2014) quien indica que al quedar desprotegida la tierra, ésta se pierde con facilidad por efecto del agua de lluvia. En comparación con la tierra Tepetate de Atécuaro, en el Ejido de Santa María Jajalpa, Edo. de México le dan un uso agrícola a esta tierra (Alfaro *et al.*, 2000).

**Tierra Polvilla.** Es conocida como *tierra de humedad* o *tierra fría* porque permanece húmeda todo el año, es de buen drenaje, profunda y porosa; en la época de secas se conserva húmeda a partir de los 10 cm de profundidad; soporta vegetación de pino encino y gran variedad de herbáceas de hoja ancha a las cuales consideran como malezas. En sus características, es similar a la Polvilla de la zonas de bosque y clima templado de la microcuenca El Calabozo (Maldonado *et al.*, 2014); cuando la tierra está seca y sin cubierta vegetal, el aire se la lleva. En Atécuaro, la superficie que ocupa la Polvilla es una zona de recarga de acuíferos, por lo que debe evitarse su deforestación y protegerla en las parcelas agrícolas después de la cosecha. Difiere con la Polvilla de áreas agrícolas y vegetación secundaria de la Reserva Ecológica de Infiernillo en donde la tierra es reseca, de color negro y textura arenosa (Bautista *et al.*, 2019; Bedolla-Ochoa *et al.*, 2018). Es parecida por su alta retención de agua a las *Echéri tupuri* localizadas en bosque de Abies y de encino en clima templado subhúmedo de la zona Purhépecha (Barrera-Bassols, 1988).

**Tierra Tepetatosa.** Esta tierra es delgada y por lo menos tiene 30 cm de espesor y después de este, es pedregosa; es pobre para los cultivos, sólo se siembran maíz de temporal asociado con frijol y calabaza, pero requiere fertilizante, también es aprovechada para el pastoreo. La vegetación que soporta es de grama, matorral, nopal y maguey. Esta tierra es pedregosa por el proceso de intemperismo del material que le da origen, en cambio, en la tierra Tepetate a partir de los 20 cm de profundidad, el material de origen es duro y sin alteración.

En cuanto al uso de las tierras, la mayoría son de temporal en donde los campesinos establecen el sistema de siembra “año y vez”, además, definen qué tierras sembrar y cuáles dejar en descanso. El maíz es el principal cultivo, excepto en la tierra Tepetate y Barrosa que destinan principalmente al pastoreo; la Barrosa en ocasiones es sometida al cultivo; el rendimiento de las tierras está en función de sus características, de la humedad y el tipo de maíz.

## Conclusiones

Se registraron seis clases de tierra: Charanda, Revuelta, Barrosa, Tepetate, Polvilla y Tepetatosa, la primera ocupa 42.8% y la última 2.97% de la superficie en la zona de pie de monte y planicie de la microcuenca. Todas las tierras presentan características físicas únicas de cada clase de tierra, aunque pueden compartir algún atributo con las demás; son de uso agrícola, excepto la tierra Tepetate y Barrosa cuyo uso principal es para pastoreo.

La mayoría de las tierras tienen similitud en su nombre y en características con tierras de otras regiones en el estado de Michoacán, excepto la tierra Tepetatosa que no se ha registrado en el estado. El conocimiento sobre la distribución y características de las tierras campesinas de Atécuaro ya existía, únicamente se sistematizó.

## Referencias

Aguilar-Orea GF, Ruiz Rosado O, Ortiz Solorio CA, Armida Alcudia L (2019). La etnoedafología como instrumento para la caracterización de agroecosistemas a nivel local, el caso de un ejido cafetalero del centro de Veracruz. *Investigaciones Geográficas* 99:e59850G. doi:10.14350/rig.59850

- Alfaro Ortiz ER, Ortiz Solorio CA, Tavarez Espinosa CA, Gutiérrez Castorena MdC, Trinidad Santos A (2000). Clasificaciones técnicas de suelos en combinación con el conocimiento local sobre tierras, en Santa María Jajalpa, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 18(2):93-101
- Barrera-Bassols N (1988). Etnoedafología Purhépecha. *México Indígena* 24:47-52.
- Bautista F, Barajas A, Alcalá-de Jesús M (2019). Peasant knowledge about the soils of the Zicuirán-Infiernillo Biosphere Reserve. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 25(3):369-381. doi:10.5154/r.rchscfa.2018.02.019
- Bautista ZF (2009). Sobre Etnopedología: Algunas precisiones (Etnoedafología). Madrid blogs. Un Universo invisible bajo nuestros pies los suelos y la vida. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2009/01/05/110656>, [consultado el 25 de febrero de 2024].
- Bedolla-Ochoa C, Bautista F, Gallegos A (2018). Environmental functions of smallholder farmer land classes in the Zicuirán-Infiernillo Biosphere Reserve, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 24(3):265-274. doi:10.5154/r.rchscfa.2017.09.058.
- Cabrera GA, Medina OLE, Alcalá de Jesus M, Sánchez EJF, Ayala GJM, (2010). Características físicas: suelos. En Cram S, Galicia L, Israde-Alcántara I (eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, pp. 44-47.
- Garduño-Monroy VH, Israde-Alcántara I (2010). Características físicas: geología. En Cram S, Galicia L, Israde-Alcántara I (eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental*, Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2010, pp. 28-33.
- Hernández-Madrugal V, Mendoza ME, Garduño-Monroy VH (2010). Características físicas: susceptibilidad de la inestabilidad de laderas. En Cram S, Galicia L, Israde-Alcántara I (eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2010, pp. 34-37.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1997). Michoacán. Datos por Ejido y Comunidad Agraria. XI Censo General de Población y Vivienda, 1990, VII Censo Agropecuario, (1991). México. ISBN 970-13-1397-6. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825116736/702825116736\\_1.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825116736/702825116736_1.pdf). [Consultado el 25 de enero de 2024].
- Maldonado López RE, Alcalá de Jesús M, González CJC, Ayala JM (2014). Caracterización de tierras campesinas en la microcuenca El Calabozo. *Revista Biológicas* 16(2):27-30.
- Mendoza ME, Bocco G (2010). Características físicas: geomorfología. En Cram S, Galicia L, Israde-Alcántara I (eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2010, pp. 48-53.
- Morales MLM (2010). Características físicas: área de estudio. En Cram S, Galicia L, Israde-Alcántara I (eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2010, pp. 20-23.
- Morett-Sánchez, Cosío-Ruiz C (2017). Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo (ASyD)* 14:125-152.
- Ortiz SCA (2010). *Edafología*. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de suelos, 8ª edición.
- Ortiz SCA (2019). *Edafología*. Editorial Trillas, México.
- Ortiz SCA, Gutiérrez CMC (2022). Etnoedafología mexicana: 43 años de experiencia: *Ciencia Nicolaita* 83:137-152. doi:10.35830/cn.vi83.567
- Ortiz SCA, Pájaro HD, Ordaz ChVM (1990). Manual para cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México, p. 62.
- Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC (2001). La Etnoedafología en México. Una visión retrospectiva. *Etnobiología* 1:44-62.
- Vidal ZR (2010). Características físicas: clima. En Cram S, Galicia L, Israde-Alcántara I (eds.), *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2010, pp. 24-27.



# Comparación sedimentológica de tres sitios en la llanura costera chiapaneca: posibles evidencias de eventos catastróficos

## Sedimentological comparison of three sites in the Chiapas coastal plain: Possible evidence of catastrophic events

Diana Cinthia Soria Caballero<sup>1\*</sup>, Gabriela Domínguez Vázquez<sup>1</sup>, Dulce M. Bocanegra Ramírez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Palinología y Cambio Climático. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup> Laboratorio de Paleoambientes, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### Historial

Manuscrito recibido: 22 de febrero de 2024

Manuscrito aceptado: 22 de agosto de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Diana Cinthia Soria Caballero

e-mail: dcinthiasoriac@gmail.com

### Resumen

La región costera chiapaneca es un sitio con elevada biodiversidad cuya importancia humana y medioambiental es innegable. Históricamente, ha albergado asentamientos humanos muy importantes, pero también ha reflejado en sus depósitos sedimentarios todas las alteraciones asociadas a ellos, desde la contaminación local hasta el calentamiento climático regional y global. En esta región, en los municipios de Pijijiapan y Tuxtla Chico, se obtuvieron tres núcleos sedimentarios con longitudes menores a 1 m (45cm<95cm) usando un muestreador tipo Livingston, los cuales fueron analizados microscópicamente para determinar los componentes principales presentes en sus sedimentos. En Pijijiapan se obtuvieron los registros sedimentarios de los sitios San Isidro y Chochohuitl; en el Chochohuitl los sedimentos analizados sugieren un ambiente de transporte y depósito de alta energía, con aporte principalmente costero. En San Isidro el registro analizado sugiere una sedimentación condicionada por el transporte y depósito de material durante eventos catastróficos de inundación y desbordamiento de los ríos que descienden desde la Sierra Madre de Chiapas. Por otro lado, en Tuxtla Chico se obtuvo un registro sedimentario en el campo experimental Rosario Izapa, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIFAP); en este, los sedimentos analizados también sugieren un ambiente de transporte y depósito de material relacionado con desbordamiento de ríos e inundaciones, pero a diferencia de San Isidro, aquí se registra además la influencia de la actividad volcánica reciente del Complejo Volcánico Tacaná, el cual ha aportado al registro el depósito de capas de cenizas bien delimitadas y depósitos de lahares. Las inundaciones sugeridas por los registros sedimentarios se pueden relacionar con la ocurrencia frecuente de huracanes y tormentas tropicales en esta zona del país. Adicionalmente, se observó la presencia de valvas de pequeños crustáceos conocidos como ostrácodos conservados únicamente en los sedimentos del sitio INIFAP, con características de ensamblaje y preservación que sugiere sufrieron un proceso de tanatocenosis de alta energía al momento de ser depositados. Este trabajo representa un primer acercamiento para determinar la dominancia de la sedimentación costera *versus* la sedimentación asociada a desbordamiento de ríos e inundaciones en el pasado en la zona costera Chiapaneca.

**Palabras clave:** Costa del océano Pacífico de Chiapas, Volcán Tacaná, Sedimentos, Tanatocenosis, Inundaciones, Ostrácodos.

### Abstract

The Chiapas' coastal region is a highly biodiverse area with undeniable environmental and human relevance. Historically, in the Pacific coast early human settlements have strongly influenced the region. The sedimentary deposits of the area recorded all the processes related to environmental changes, such as global warming, but also human-induced changes, such as deforestation and pollution. Cores of 45cm<95cm long, from three sites along the Pacific Ocean floodplain of Chiapas showed relevant factors affecting the dynamics of sedimentation. These were obtained from the localities of Pijijiapan and Tuxtla Chico and the components of the core sediments were microscopically analyzed. In Pijijiapan, sedimentary records were analyzed for the sites San Isidro and Chochohuitl. The Chochohuitl site recorded a high-energy sedimentary environment, influenced by coastal dynamics that caused poorly preserved remains of ostracods. The San Isidro site recorded sedimentary environments influenced by transportation and deposition of materials related to catastrophic events, such as flooding and river overflows from the drainage of the Sierra Madre de Chiapas. Meanwhile, in Tuxtla Chico a core was obtained in the Rosario Izapa experimental campus, INIFAP. This core also recorded a sedimentary environment influenced by flooding and river overflows, but unlike San Isidro, here the influence of deposits from Tacaná volcano are observed, such as well-defined 10 cm-thick ash layers and lahar deposits. The floods suggested by the sedimentary records have been related to the frequency of tropical storms and hurricanes that have affected Chiapas. Additionally, at the INIFAP site we observed the presence of ostracods valves, showing associations and preservation characteristics related to a high-energy thanatocoenosis deposit. This work is a first attempt to characterize the influence of coastal sedimentation *versus* flood-related sedimentation in the coastal plain of Chiapas.

**Keywords:** Chiapas Pacific ocean coastal, Tacaná volcano, Sediments, Flooding, Ostracods, Thanatocoenosis.

## Introducción

Las regiones costeras son áreas de suma importancia a nivel mundial, por su enorme productividad biológica y las diversas actividades humanas que allí se concentran. No obstante, estas zonas son extremadamente frágiles, no solo por los cambios de uso de suelo, la extracción de sus recursos y la contaminación, sino también por los efectos del calentamiento global y los patrones generales de cambio climático (Herrera-Silveira *et al.*, 2004; Bouillon *et al.*, 2008; Gliman *et al.*, 2008; Donato *et al.*, 2011).

En la costa chiapaneca, las zonas de manglares y lagunas-estuarios representan sitios emblemáticos por su elevada biodiversidad y porque actúan como filtros naturales de contaminantes del agua, pero también por el papel que juegan en la protección de la costa contra huracanes, inundaciones y erosión (Flores-Verdugo, 2007; Alongi y De Carvalho, 2008; Walters *et al.*, 2008). Sin embargo, en los últimos cuarenta años la costa se ha visto afectada por el crecimiento poblacional y la deforestación de la Sierra Madre de Chiapas, estando expuesta a inundaciones severas, deslizamientos de terreno y asentamientos diferenciales. Esto se ha reflejado en la sobrecarga de sedimentos que llevan los ríos y arroyos a la costa, incrementando el azolvamiento natural de lagunas, estuarios y deltas (Castillo Santiago *et al.*, 2003; Tovilla-Hernández, 2004).

Los procesos que incrementan el azolvamiento afectan directamente los registros sedimentarios de la zona costera, alterando las tasas de sedimentación, las partículas dominantes, los rangos granulométricos e inclusive, la conservación de microfósiles indicadores del cambio medioambiental tales como: polen, fitoplancton y zooplancton. El análisis de las alteraciones en los registros sedimentarios se ha convertido en una herramienta de suma importancia para identificar cambios abruptos en la deposición natural de los sedimentos, y cuyo origen puede ligarse a eventos específicos que modifican los ecosistemas, ya sea de manera abrupta o paulatina, por ejemplo, fenómenos climáticos catastróficos, los riesgos geológicos o bien el impacto humano. Este estudio representa un primer acercamiento para entender la dinámica de la zona costera chiapa-

neca a partir de núcleos de sedimentos y determinar la influencia de los procesos naturales o inducidos preservados en el registro sedimentario.

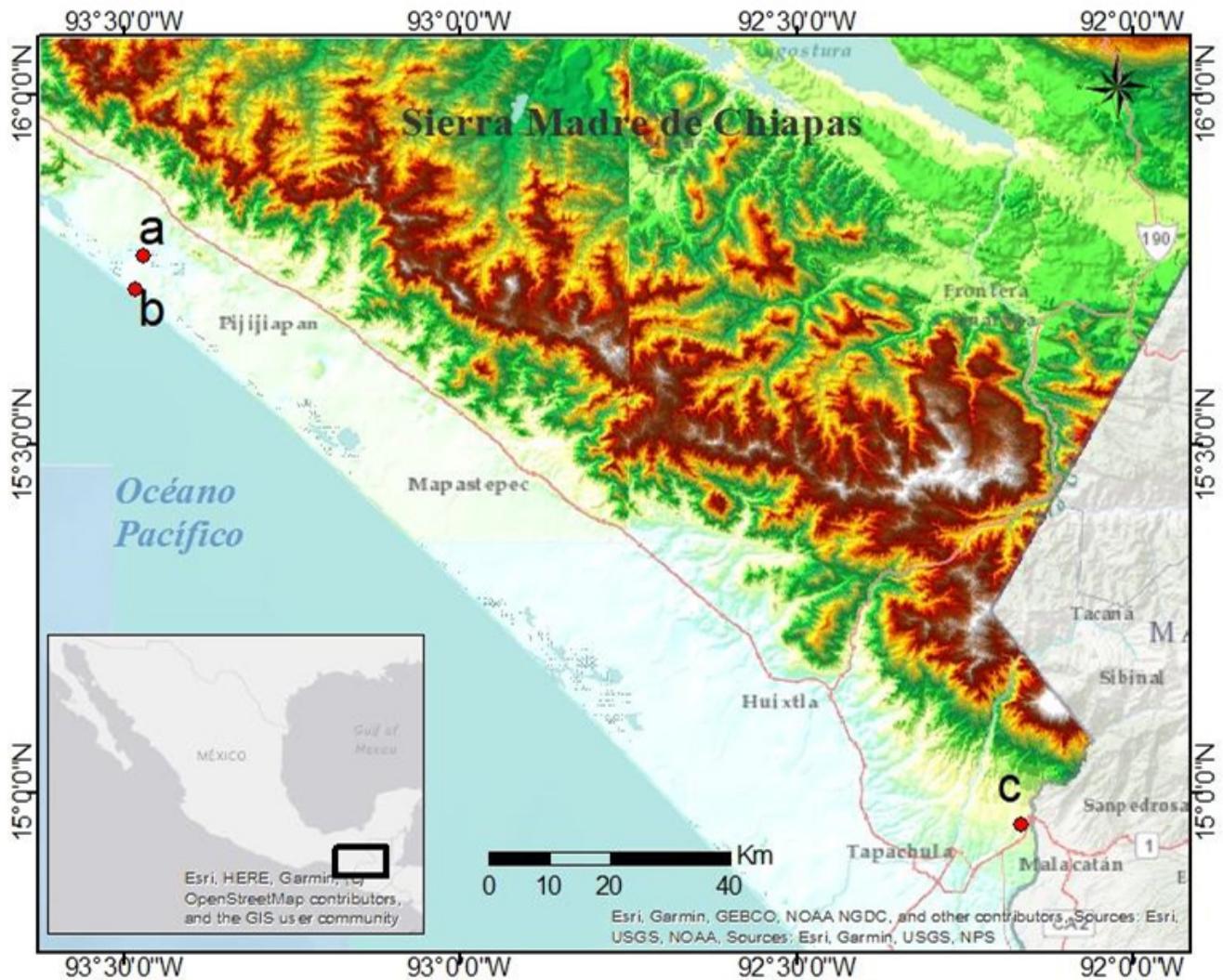
## Materiales y métodos

### Área de estudio

El presente trabajo seleccionó varios sitios del litoral de la costa de Chiapas (**Figura 1**). Este litoral forma una planicie paralela al océano Pacífico, con una longitud de 310 km y un ancho variable de 19 a 47 km. En esta planicie desembocan los ríos que nacen en la Sierra Madre de Chiapas y forman áreas inundables que son hábitats muy importantes para la flora y fauna de la región (Tovilla-Hernández, 2005).

Los núcleos analizados se tomaron uno en el municipio de Tuxtla Chico, ubicado en la base del Volcán Tacaná y dos en el municipio de Pijijiapan, en la planicie costera pacífica del estado de Chiapas. En Tuxtla Chico, el sitio de muestreo se localizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIFAP) campo experimental Rosario Izapa (14°58'31.47" N, 92°09'03.90" O, a 500 m.s.n.m.); este sitio se encuentra dentro de la llanura de inundación del río Mixcum–Suchiate y aquí afloran materiales provenientes de las erupciones del volcán Tacaná (Hidalgo-Juárez, 2021; Domínguez-Vázquez *et al.*, 2023). En Pijijiapan, el primer sitio de muestreo se localizó en el manglar de *Conocarpus* ubicado en la Ranchería Chochohuitl (15°35'02.60" N, 93°19'05.83" O, a 0 m.s.n.m.), el cual es afectado en su dinámica por el Océano Pacífico. El segundo punto de muestreo se localizó en San Isidro Pijijiapan (15°42'41.95" N, 93°22'25.28" O, a 10 m.s.n.m.), en la planicie de inundación del Océano Pacífico, a 18 km al norte del sitio Chochohuitl. A pesar de ser centros turísticos muy poblados de Pijijiapan, ninguno de estos sitios se encuentra en alguna categoría de conservación.

Los tres sitios analizados se encuentran dentro de la provincia fisiográfica Cordillera Centroamericana, en los sistemas terrestres de Llanura costera y Llanura costera con lomerío, la cual abarca 23 640 km<sup>2</sup> y es una zona de alto valor comercial debido a las actividades agropecuarias que



**Figura 1.** Localización geográfica de los sitios de estudio. **a)** San Isidro Pijijiapan. **b)** Manglar del Chocohuital. **c)** INIFAP Campo Experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, en el estado de Chiapas, México.

ahí se realizan. Están influenciadas por regímenes climáticos cálidos – húmedos (Aw y Am) con temperaturas medias anuales entre  $35^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ . Esta zona sostiene vegetación caracterizada por sabanas de inundación, selvas inundables de Canaoite (*Bravaisia integerrima*), selvas altas perennifolias, pequeñas áreas de selva baja caducifolia, así como agricultura de temporal, que crecen sobre suelos tipo acrisol, cambisol, regosol y solonchak (García *et al.*, 2003, López *et al.*, 2003). La geología regional incluye depósitos lacustres y aluviales cuaternarios en la zona de planicie, lutitas, areniscas y calizas cuaternarias en la zona de costa. Hacia la Sierra, se encuentran rocas ígneas intrusivas y metamórficas, tales como granitos, granodioritas, tonalitas,

granitoides, ortogneiss y esquistos cristalinos con edades que van desde el Precámbrico hasta el Paleozoico, pertenecientes al Grupo las Ovejas, cubiertos por secuencias mesozoicas sedimentarias pertenecientes a las formaciones Todos Santos, Mogoñé, San Ricardo, Chinameca, Grupo Sierra Madre, Ocozocoautla, Juan Crispin y Méndez. En la zona del Tacaná se encuentran los depósitos volcánicos de tendencia intermedia y composición calco-alcalina, predominando las lavas dacíticas, andesíticas y andesítica-basálticas, así como presencia de depósitos aluviales y suelos residuales (Vazquez *et al.*, 2022; INEGI, 2010; García-Palomo *et al.*, 2006; Ortega-Gutierrez *et al.*, 1992).

De acuerdo con el Programa Estatal de

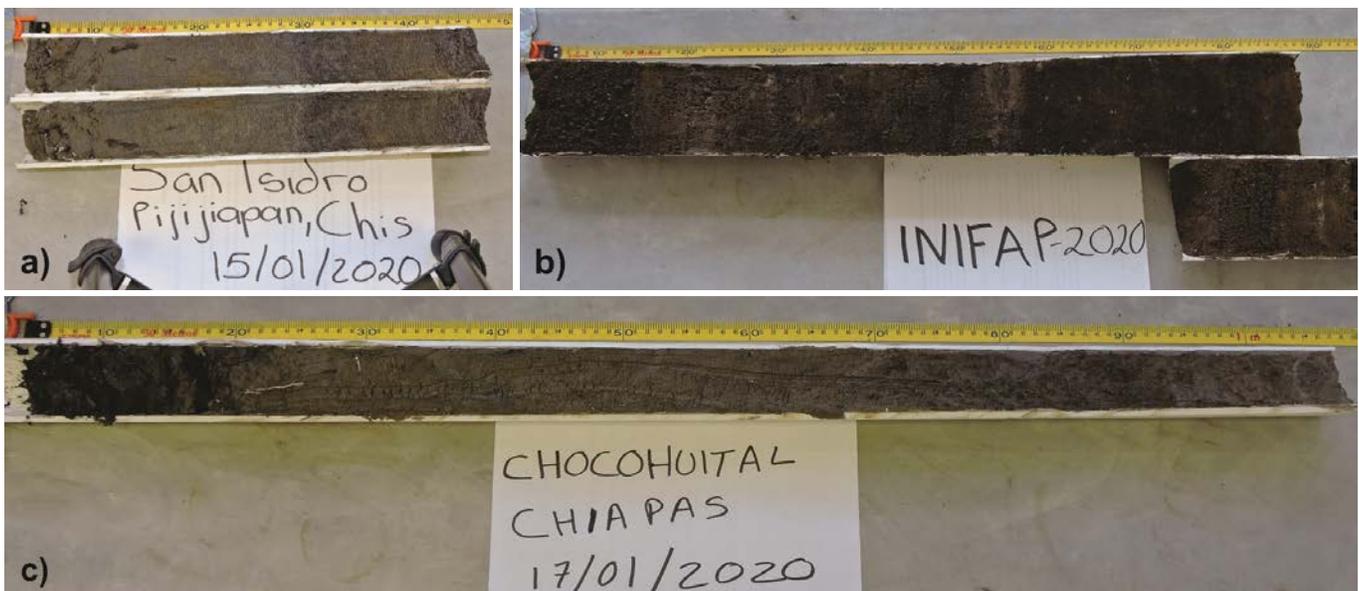
Ordenamiento Territorial de Chiapas, los sitios aquí analizados se localizan en las unidades morfoedológicas denominadas 1) Superficie de acumulación litoral, playas y cordones litorales, y 2) superficie costera de inundación. Ambos son ambientes estables con sedimentación continua afectada por la transición continente-océano, en donde se depositan principalmente terrígenos de granulometría variable (arcillas, arenas, gravas) y edad Cuaternaria; estos sedimentos provienen tanto de origen marino (depositados durante los eventos de transgresión), como continental (depositados por escurrimientos de las zonas más elevadas durante la época de lluvias) y pueden contener horizontes con altos contenidos de sales (Castillo Santiago *et al.*, 2003).

#### Extracción y procesamiento de núcleos

Los núcleos fueron extraídos con un muestreador tipo Livingston, usando un tubo de PVC hidráulico de doble pared de 100 cm de largo por 10 cm de diámetro. En el sitio INIFAP se extrajo un núcleo de 91 cm de longitud total; en el Chocohuital el núcleo tuvo una longitud de 95 cm y en San Isidro Pijijiapan tuvo una longitud de 40 cm (**Figura 2**). La resistencia del terreno a la perforación manual en San Isidro Pijijiapan causó que se obtuviera

el núcleo más corto de los sitios analizados. Los núcleos extraídos fueron sellados en campo para evitar su contaminación y fueron trasladados al Laboratorio de Palinología y Cambio Climático, de la Facultad de Biología en la UMSNH para su análisis.

En el laboratorio, los núcleos fueron cortados a lo largo por la mitad, conservándose una mitad como testigo y la otra fue utilizada para los análisis. Se describió la estratigrafía general antes de tomar las muestras del núcleo. Se muestrearon los núcleos en intervalos de 5 cm o al notar cambios relevantes en la sedimentación. Las muestras fueron descritas microscópicamente, colocándolas en cajas de Petri bajo un microscopio estereoscópico con un aditamento de lámpara micropaleontológica para mejorar la iluminación de la muestra. Los diferentes componentes presentes en los sedimentos como: cristales sueltos de minerales, fragmentos de líticos, fragmentos de vidrio volcánico, restos de materia orgánica, agregados de carbonatos y porcentaje de arcillas, se analizaron mediante conteos en un mínimo de cinco campos de visión y un máximo de ocho, con un aumento de 20x para cada muestra, utilizando un microscopio estereoscópico y las cartas de estimación visual de porcentajes de componentes modificadas a partir de las empleadas



**Figura 2.** Fotografías de los núcleos tomados en la zona costera del Océano Pacífico de Chiapas con escala centimétrica adjunta. **a)** núcleo del sitio San Isidro (40 cm de largo), **b)** núcleo del sitio INIFAP (95 cm de largo) y **c)** núcleo del sitio Chocohuital (91 cm de largo).

en petrografía sedimentaria. Los conteos obtenidos para cada componente en cada campo de visión de cada muestra fueron promediados y presentados en gráficas de porcentajes.

### **Análisis micropaleontológico**

En algunas de las muestras se observaron como parte de sus componentes la presencia de valvas de ostrácodos, por lo cual se tomó una porción de cada muestra para prepararla para un análisis micropaleontológico que permitiera separar y limpiar los ostrácodos del resto del sedimento. Para este análisis se tamizaron los sedimentos de cada muestra en húmedo utilizando mallas de apertura No. 60 y 150, recuperando los restos atrapados en cada malla y sometidos posteriormente a un lavado. Para ello, el sedimento tamizado se mezcló con 250 ml de agua destilada, 0.5 g de bicarbonato de sodio y 2.5 ml de detergente con pH neutro (Extran). Los sedimentos se mantuvieron tapados en esta solución durante 5 días, agitando suavemente la mezcla tres veces al día, con el objetivo de desprender sedimentos adheridos a las valvas. Posteriormente, los sedimentos se enjuagaron con agua destilada, dándoles un enjuague final con alcohol etílico desnaturalizado, reteniéndolos en filtros Whatman. Los sedimentos retenidos en los filtros se dejaron secar a temperatura ambiente. Una vez secos, las valvas de ostrácodos se separaron manualmente usando un microscopio estereoscópico con aumento de 40x, una aguja de acupuntura y un pincel fino (No. 0, marca Kolinski); los ejemplares separados se colocaron en viales de plástico hasta su montaje final en laminillas micropaleontológicas Plummer con goma de tragacanto. Los ejemplares fueron descritos, medidos e identificados usando las claves de Delorme (1970 y 1971), Griffiths *et al.* (1993), Horne *et al.* (2002) y Meisch (2000).

## **Resultados**

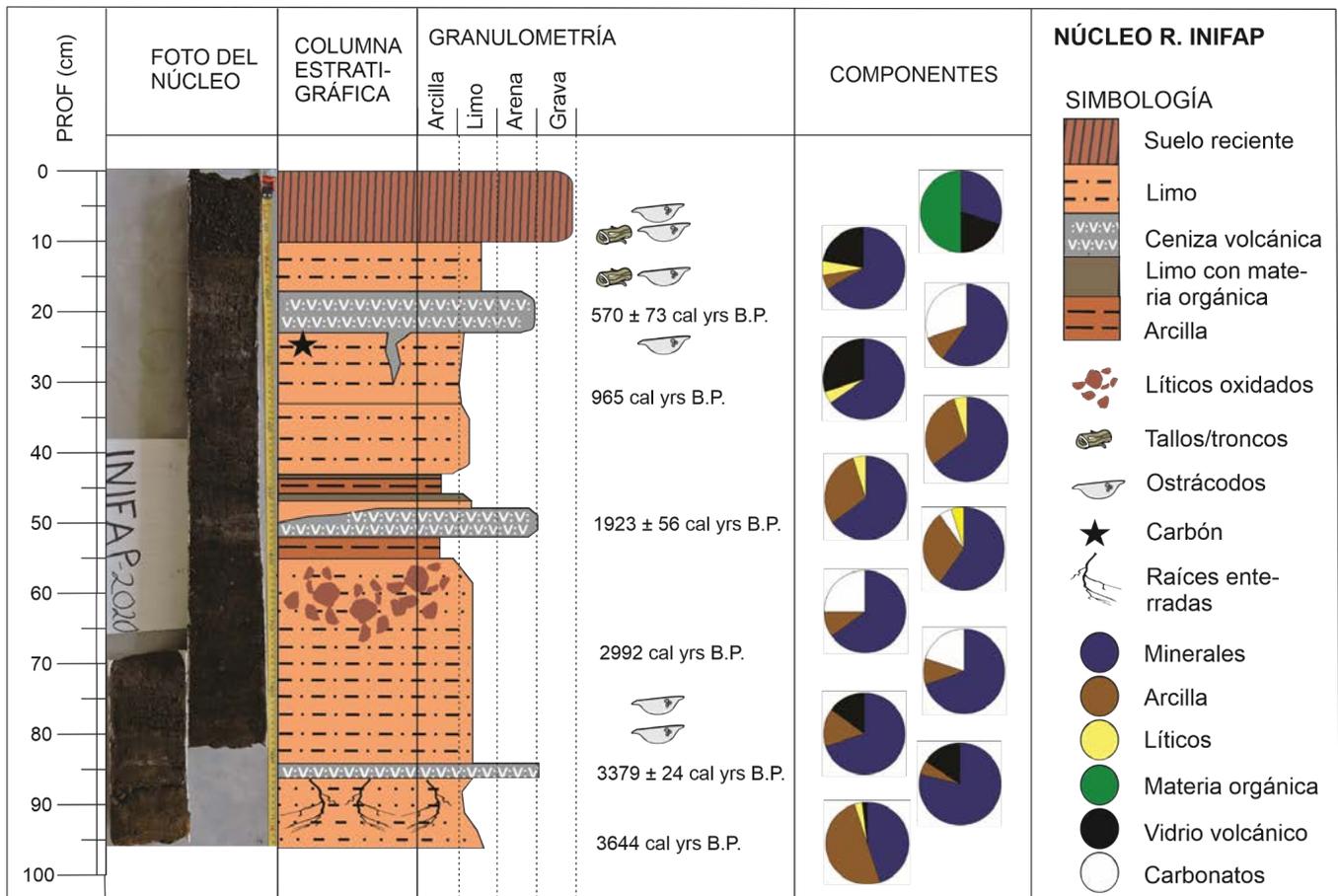
### **Sitio INIFAP campus experimental Rosario Izapa**

Los sedimentos del núcleo INIFAP muestran componentes finos por la sedimentación de la llanura de inundación mezclados con otros

derivados de la erosión de los depósitos volcánicos del volcán Tacaná (**Figura 3**). La base del núcleo se ubicó a 91 cm de profundidad y mostró una asociación mineralógica dominada por cristales de anfíboles y cuarzo (30%), con un 50% de arcilla y menos del 15% de cristales de olivinos y piroxenos, el 5% restante corresponde a fragmentos líticos y vidrio volcánico; no se registró presencia de materia orgánica. La madurez textural de estos sedimentos basales fue mayor que la del resto del núcleo, a excepción de los 10 cm superiores del mismo.

A 85 cm de profundidad se encontró un nivel de ceniza volcánica descrito en la estratigrafía con una edad de 3,128 años AP, mostrando una asociación principal de cristales de olivino y piroxenos (<65%), seguidos en menor medida por agregados de anfíboles y plagioclasas (<15%). Esta asociación se mantuvo hasta los 70 cm de profundidad, variando únicamente en los contenidos de arcilla que pasan de ser menor al 5% a mayor al 15%, y en las proporciones de anfíboles que aumentan a 25%. Ambas muestras presentaron una cantidad moderada de vidrio volcánico (<15%) y nula materia orgánica. En estas capas sedimentarias se registraron hallazgos de caparazones de ostrácodos aislados del género *Limnocythere* (a 80 cm de profundidad) y el género *cf. Potamocypris* (a 75 cm de profundidad). Estos caparazones se observan muy erosionados y rotos en el área de la charnela, sugiriendo retrabajamiento asociado a un ambiente de depósito de alta energía.

A 65 cm de profundidad se observó un cambio en las asociaciones mineralógicas pues comenzaron a ser más abundantes los cristales de moscovita, asociados con piroxenos (45%), seguidos de olivinos, agregados de anfíboles y plagioclasas (25%). Se registró además la presencia de agregados de carbonatos (20%) y un bajo porcentaje de arcillas (10%); no se observó la presencia de líticos, vidrio volcánico ni materia orgánica. En los 10 cm sobreyacentes no se observaron moscovitas ni olivinos y la dominancia se alternó entre agregados de plagioclasas con piroxenos (35%) y anfíboles con piroxenos (35%), aunque la presencia de agregados de carbonatos (25%) y el porcentaje de arcilla (10%) se mantuvieron constantes; no se observaron líticos,



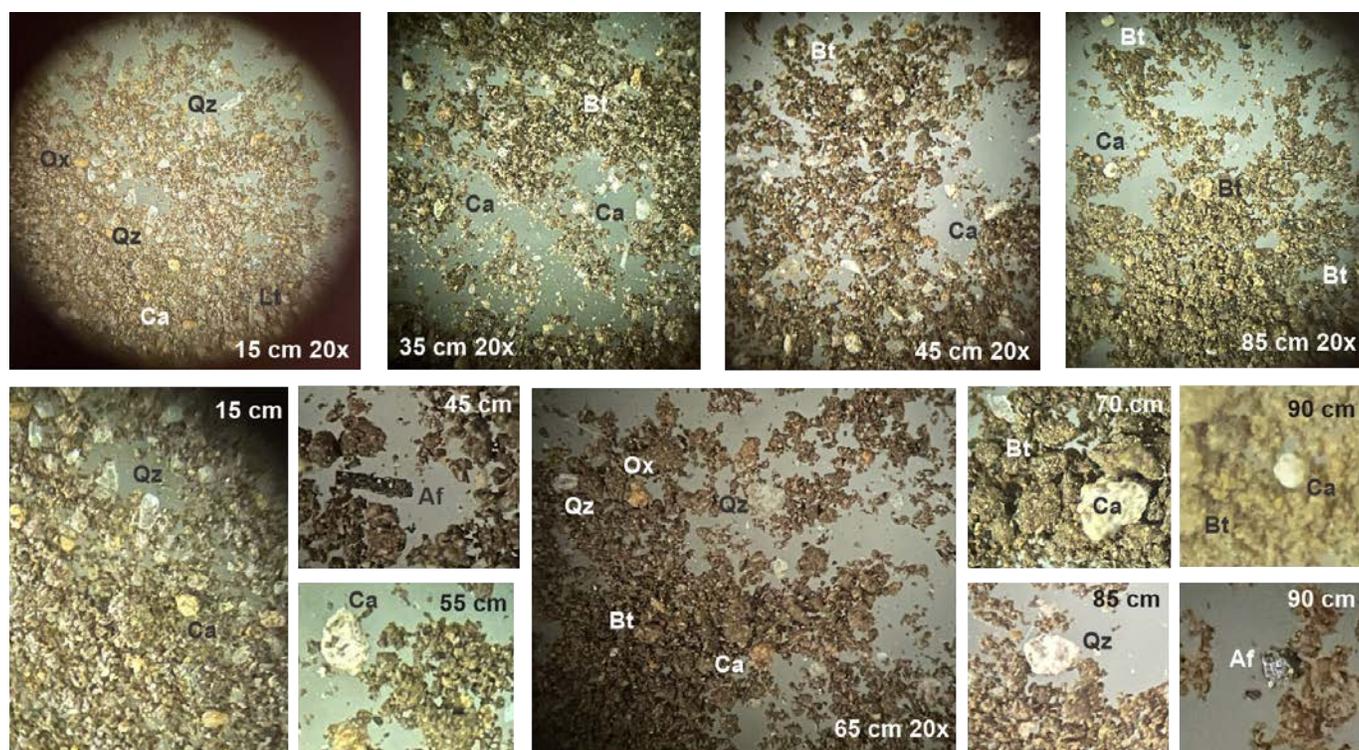
**Figura 3.** Registro sedimentario del sitio INIFAP, campus experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Chiapas. Fotografía del núcleo, interpretación estratigráfica, granulometría dominante y análisis de componentes para la secuencia.

vidrio volcánico ni materia orgánica. La presencia de agregados de carbonatos sugiere un ambiente más seco, que permitió su precipitación.

Las moscovitas vuelven a aparecer a los 50 cm de profundidad (20%) en asociación con agregados de anfíboles, pero se vuelven dominantes en los sedimentos a partir de los 45 cm de profundidad y hasta 15 cm de profundidad (35%). En estos estratos se asociaron principalmente con anfíboles y cuarzo (30-40%), se observaron porcentajes moderados de arcilla (~30%) hasta los 35 cm de profundidad, así como porcentajes muy bajos de líticos (<5%), sugiriendo condiciones ambientales más húmedas que permitieron mayor madurez textural en los sedimentos. De 35 a 25 cm de profundidad las moscovitas se asociaron con cristales de piroxenos y olivinos (35%), seguidos en proporción por agregados de plagioclasas, anfíboles (30%), fragmentos de vidrio volcánico (30%) y escasos

líticos (<5%), asociados a la ceniza volcánica reportada en la estratigrafía a los 1,821 años AP. Aquí se registró la presencia de caparzones completos, pero muy erosionados, de varios géneros de ostrácodos como *cf. Limnocythere*, *cf. Potamocypris*, y posiblemente otros de la familia *Bairdiidae*, cuyas características diagnósticas taxonómicas no se conservaron lo suficiente para asignarles un género definitivo (Figura 4).

Posteriormente, desde los 25 cm de profundidad y hasta los 15 cm de profundidad, los sedimentos se componen principalmente de cuarzo y agregados de plagioclasas (45%) y carbonatos (30%), seguidos en mucha menor proporción por agregados de anfíboles y moscovitas y con cristales aislados de piroxenos (15%), así como bajos contenidos de arcillas (10%), sugiriendo que las condiciones ambientales locales fueron de mayor sequedad, permitiendo la precipitación de carbonatos. A partir de los 15 cm



**Figura 4.** Imágenes de los componentes de los sedimentos analizados para el núcleo INIFAP campus experimental Rosario Izapa. Se observan los agregados de arcillas color café claro distribuidos en todas las muestras. Los centímetros indican la profundidad a la que fue obtenida la muestra, todas las observaciones se realizaron con aumentos 20x. Abreviaturas: Qz: Cuarzo, Ca: agregados de carbonatos, Ox: agregados oxidados, Bt: Biotitas, Af: Anfíbol, Lt: Líticos.

de profundidad y hasta 5 cm de profundidad domina la asociación de cuarzo y cristales de anfíboles (35%), con la presencia moderada de fragmentos de vidrio volcánico (20%), seguido de cristales de moscovita y piroxenos (25%) y escaso contenido de arcilla (5%). Finalmente, en los 5 cm superiores del núcleo, los sedimentos presentan gran contenido de materia orgánica (50%) y fragmentos vegetales de raíces y tallos, la asociación mineral refleja un nuevo aporte de ceniza volcánica pues vuelven a dominar los piroxenos y anfíboles (20%), con contenidos moderados de vidrio volcánico color café oscuro a negro (20%) y en menor proporción moscovitas y olivinos (10%).

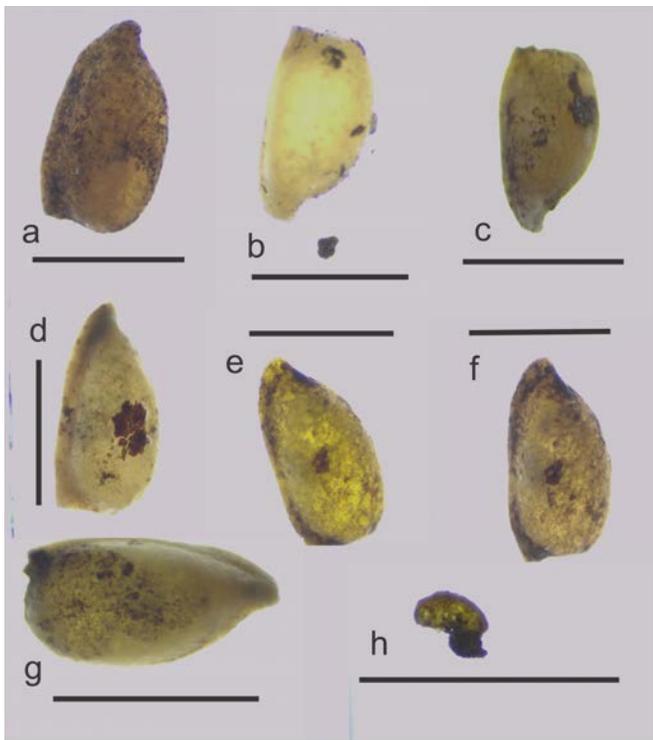
En los 20 cm superiores del núcleo se observó la presencia de caparzones de ostrácodos, todos adultos, cerrados, articulados y completos, algunos con huellas de choques (fracturas angulares), otros con restos de sedimentos atrapados dentro de las valvas cerradas. El ensamble es dominado por organismos pertenecientes a la familia Hemicytheridae cuya morfología sugiere que se

trata de la especie *cf. Aurila convexa*, una especie marina típica de aguas cálidas (**Figura 5**). No se registran juveniles, únicamente adultos, por lo que puede tratarse de individuos alóctonos, depositados en este sitio por algún fenómeno repentino que aumentó la energía del depósito y que puede estar relacionado con cambios en las corrientes de agua marina que llegaban hasta este sitio.

Especímenes localizados a una profundidad de entre 0 y 20 cm, muestran detalles de incrustación de materiales finos en su exterior, la presencia de sedimentos atrapados dentro de las valvas y detalles de caparzones cerrados o con evidencias de impacto por choque (**Figura 6**). El alto grado de erosión que sufrieron las valvas y la cantidad de sedimento atrapado dentro de ellas, así como fuertemente adherido a su exterior, indica su exposición a condiciones ambientales muy energéticas, por ejemplo, ventarrones.

### Sitio Manglar de Chocohtual

Los sedimentos del núcleo del manglar Chocohtual



**Figura 5.** Ostrácodos obtenidos de los sedimentos del núcleo INIFAP. En los sedimentos de los 20 cm superiores del núcleo se localizaron: **a-g:** cf. *Aurila convexa*, **h:** cf. *Potamocypris*. Barra de escala: 1 mm

observados bajo el microscopio estereoscópico mostraron componentes asociados a las dinámicas de la costa del Pacífico, con granulometrías características de los depósitos costeros, predominando las arenas finas y limos (**Figura 7**). La base del núcleo se encuentra a 95 cm y muestra una asociación mineralógica dominada por cristales de cuarzo, micas y anfíboles (hasta con más del 50%), con un contenido de arcilla menor al 15% y con un 30% de fragmentos líticos heterogéneos, sin registrarse materia orgánica ni vidrio volcánico; esta zona muestra una granoselección buena, así como madurez textural moderada.

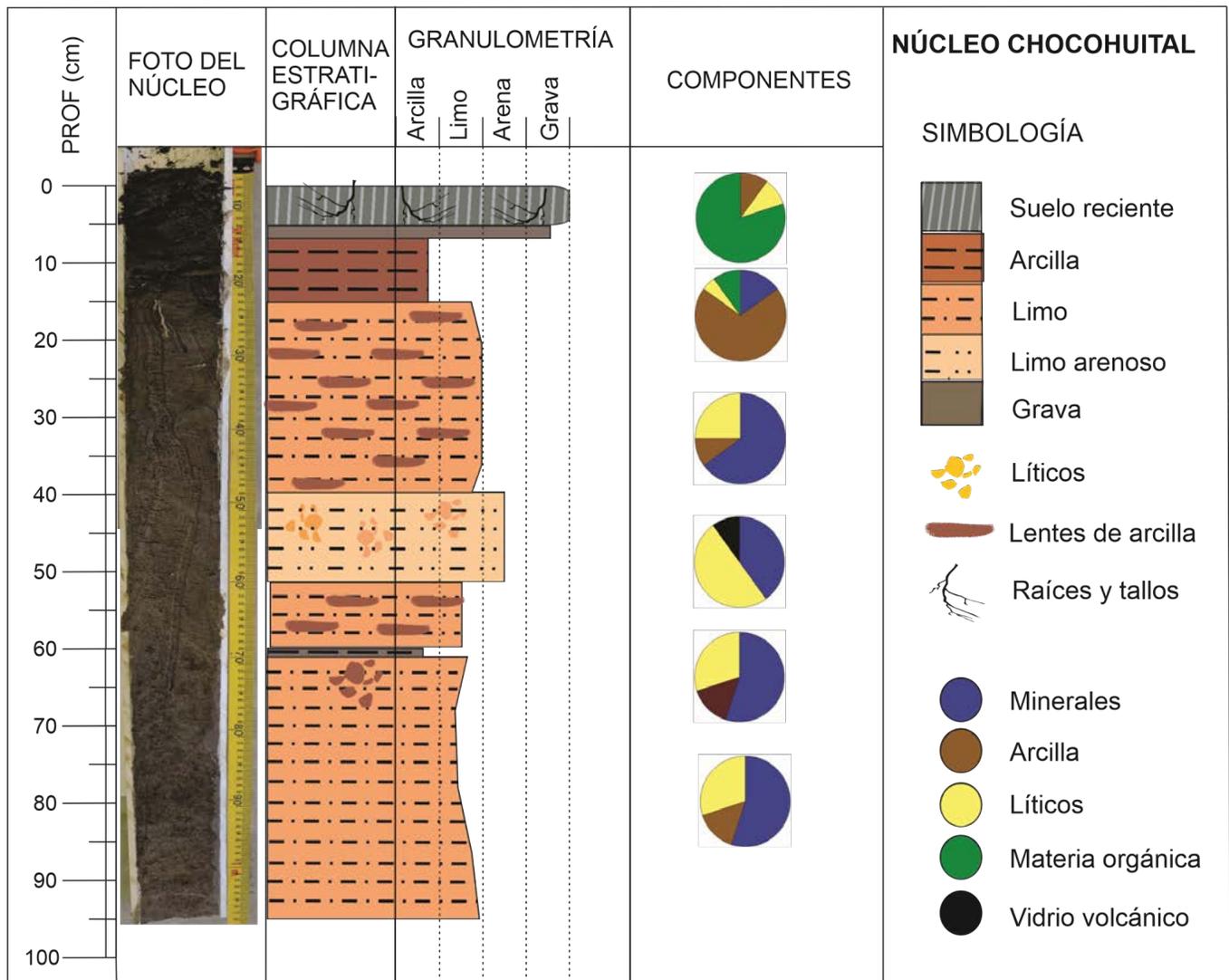
A 60 cm de profundidad se observa una capa de limos color café claro, de 8 cm de espesor, en el cual se intercalan estructuras lenticulares muy delgadas de arcillas color café oscuro. Su contacto inferior se observa enriquecido en arcilla café muy oscuro. Los sedimentos muestran una asociación principal de cristales de cuarzo y plagioclasas (hasta 40%), seguidos en menor medida por micas y anfíboles (15%), así como abundantes fragmentos de líticos



**Figura 6.** Fotografías de ostrácodos recuperados en sedimentos del núcleo INIFAP. Especímenes localizados a una profundidad de entre 0 y 20 cm, mostrando detalles de incrustación de materiales finos en su exterior, la presencia de sedimentos atrapados dentro de las valvas y detalles de caparzones cerrados o con evidencias de impacto por choque (fracturas ortogonales).

(hasta 30%), los contenidos de arcilla, vidrio volcánico y materia orgánica se mantuvieron igual al nivel anterior (**Figura 8**). Sobreyaciendo a la capa anterior se observa una capa de limos arenosos color café muy claro de 12 cm de espesor y que se caracteriza por presentar escasos agregados de arcilla y casi nula materia orgánica, pero dominan en sus componentes los fragmentos de líticos heterogéneos (hasta 50%), así como los cristales minerales de cuarzo, micas y plagioclasas (40%), todos con excelente granoselección y en menor proporción vidrio volcánico (10%). Posteriormente, a los 40 cm de profundidad se observa una capa de 25 cm de grosor, muy similar a la ubicada a 60 cm de profundidad, que consiste de limos color café claro, en que se intercalan estructuras lenticulares muy delgadas de arcillas (10%) color café oscuro (**Figura 8**). La asociación mineralógica también es similar, con dominancia de cristales de cuarzo y plagioclasas (45%), fragmentos de líticos (25%) y con cantidades moderadas de micas y anfíboles (20%).

A los 10 cm de profundidad la granulometría se vuelve más fina y se observa una capa arcillosa de 8 cm de espesor y coloración café oscuro, su composición se caracteriza por un alto contenido de arcilla (70%) y presencia moderada a escasa de cristales minerales de cuarzo y plagioclasas (15%) y fragmentos líticos (5%), así como materia orgánica



**Figura 7.** Registro sedimentario del sitio Chocohuital, Municipio de Pijijiapan. Fotografía del núcleo, interpretación estratigráfica, granulometría dominante y análisis de componentes para la secuencia.

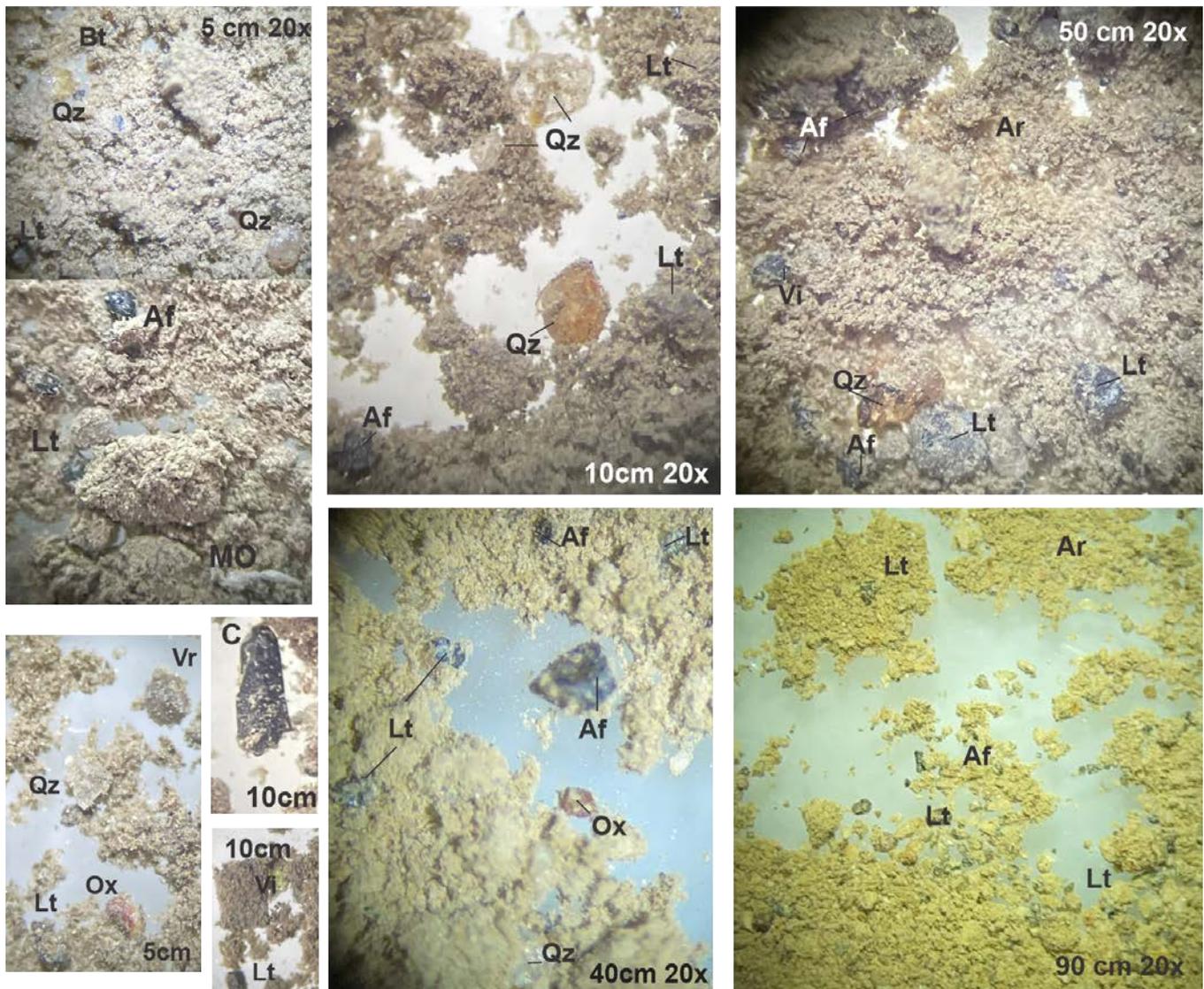
(10%); esta capa presenta una alta madurez textural y es sobreyacida por un lente de grava de 2 cm de espesor (**Figura 8**). Finalmente, coronando toda la secuencia y por encima del lente de grava se observa el suelo reciente, con un espesor de 7 cm y color café muy oscuro debido a la presencia de materia orgánica vegetal en descomposición tales como restos de raíces y tallos que aún son visibles dentro del núcleo.

Para esta zona, se observaron dentro de los sedimentos cristales aislados de cuarzo, micas y anfíboles con marcas de abrasión y fracturamiento mecánico (**Figura 9**), lo cual concuerda con lo reportado previamente para otras zonas del área, que son sedimentos con presencia de cristales de cuarzo

con microtexturas derivadas de la abrasión mecánica (p.ej. marcas de percusión, marcas en forma de V y fracturas concoidales); lo anterior es consistente con un ambiente subacuoso de alta energía, cuyo agente de movilización son las corrientes eólicas muy energéticas (vientos veloces), lo cual favorece e incrementa la colisión grano a grano entre las partículas que luego se depositaron en el manglar (Armstrong-Altrin *et al.*, 2022).

### Sitio San Isidro Pijijiapan

El núcleo muestra una granulometría muy fina con dominancia de arcillas y asociaciones mineralógicas homogéneas a lo largo de la secuencia sedimentaria, lo cual contrasta con los otros dos sitios estudiados



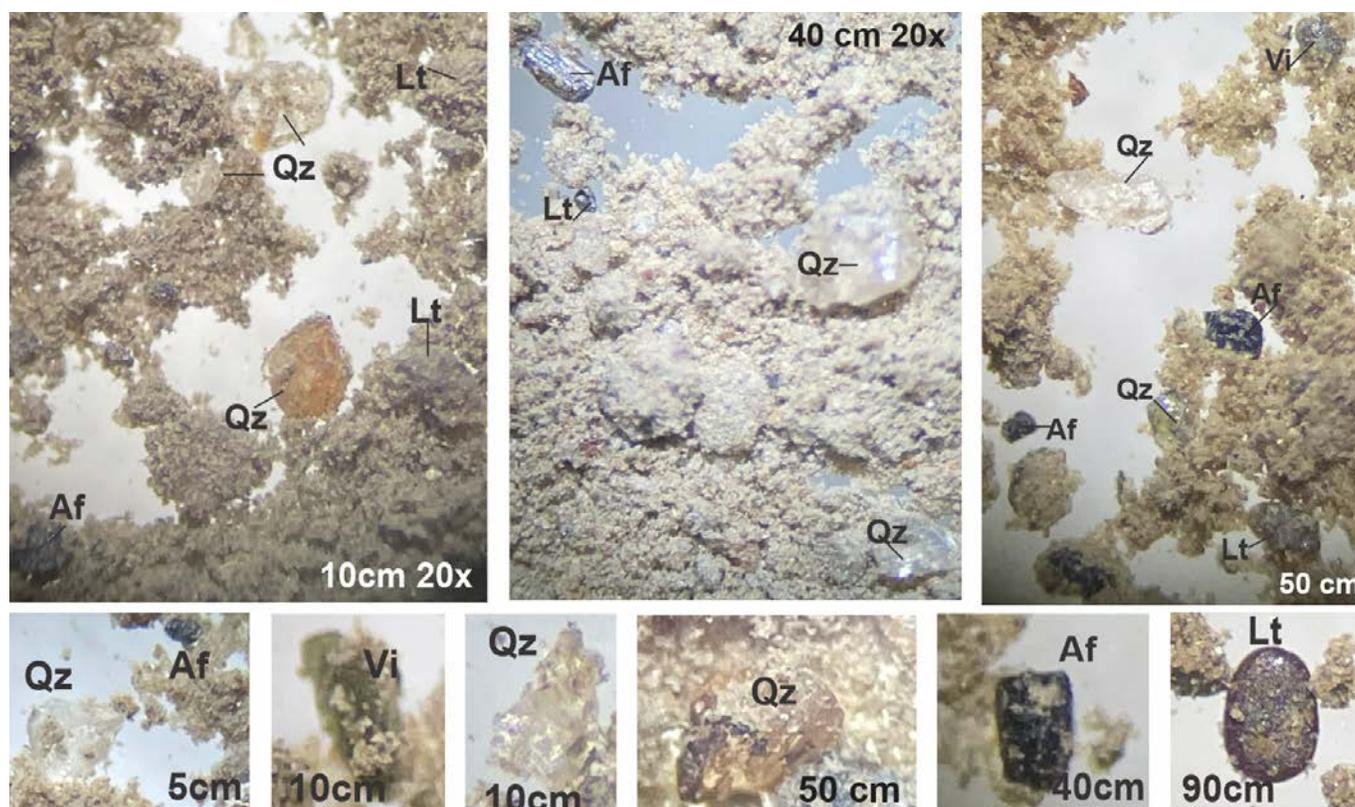
**Figura 8.** Imágenes de los componentes de los sedimentos analizados para el núcleo Chocohuilal. Se observan los agregados de arcillas color café amarillo distribuidos en las muestras. Los centímetros indican la profundidad a la que fue obtenida la muestra, todas las observaciones se realizaron con aumentos 20x. Abreviaturas: Qz: Cuarzo, Ca: agregados de carbonatos, Ox: agregados oxidados, Bt: Biotitas, Af: Anfíbol, Lt: Líticos, Ar: Arcillas, MO: Material orgánico, Vi: Vidrio volcánico, C: Carbón.

**(Figura 10).**

La base del núcleo se encuentra a 40 cm de profundidad y se compone de un estrato de 3 cm de espesor de arcilla color café muy claro a crema (75%), con una asociación mineralógica con presencia moderada a escasa de cristales de cuarzo y plagioclasas (hasta 15%), así como escasos fragmentos líticos (menos del 10%). Posteriormente, se observa una capa de 8 cm de espesor de arcilla limosa color café con tintes anaranjados, indicando oxidación de algunos componentes minerales, esta unidad presenta cristales de cuarzo y anfíboles (35%), así como

abundantes fragmentos de líticos de tendencia máfica (hasta 25%) y alto contenido de arcilla (<40%).

A los 29 cm profundidad se observa un contacto erosivo ondulado sobreyacido por una capa de 6 cm de espesor de arcilla (40%) color café muy oscuro, casi negro, caracterizada por la presencia de cristales de anfíboles, micas, cuarzo (30%) y escasas plagioclasas (10%), así como fragmentos líticos de tendencia máfica (20%). A esta unidad le sobryace una capa de 16 cm de espesor similar a la observada a 37 cm de profundidad, caracterizada por sedimentos arcillo-limosos color café claro



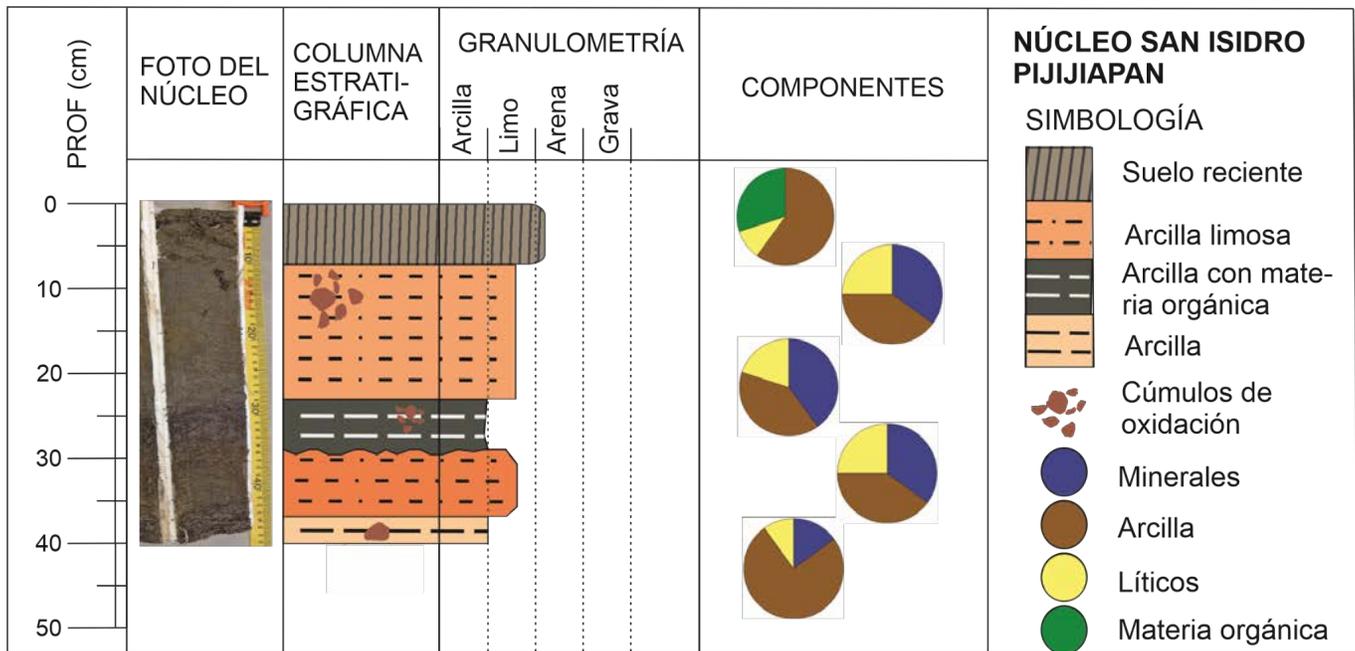
**Figura 9.** Fotografías de los componentes indicadores de abrasión mecánica en los sedimentos del núcleo Chocohuital. Qz: cuarzo con fracturas y abrasión, Af: anfíboles, Lt: líticos, Vi: vidrio volcánico. Todas obtenidas en microscopio estereoscópico en aumento de 20x.

con estructuras circulares color anaranjado-rojizo, indicando oxidación de los minerales que lo componen, su asociación mineralógica se caracteriza por la presencia de cristales de cuarzo, anfíboles y micas (35%), así como abundantes fragmentos de líticos de tendencia máfica (hasta 25%); el contenido de arcilla se mantuvo estable (40%) (**Figura 11**). Finalmente, Sobreyaciendo a toda la secuencia sedimentaria se observa una capa de 7 cm de espesor de arcilla color café oscuro con estructura columnar o en bloques, donde los componentes dominantes fueron la arcilla (<60%), seguido de materia orgánica vegetal (<30%) y líticos en menor proporción (10%); las características de esta capa sugiere que puede tratarse de un suelo con propiedades vérticas bien desarrolladas, sin embargo se requieren de más estudios para determinar su clasificación con seguridad.

## Discusión

Los registros sedimentarios para los tres sitios

analizados muestran que, a pesar de que comparten ambientes en común (p.ej. se encuentran en la llanura costera), existen factores particulares que influyen en la composición dominante de cada uno, y que tienen que ver con la geología de la zona y los fenómenos climáticos extremos, como los huracanes. En el sitio de San Isidro Pijijiapan, los sedimentos reflejan que el sitio permanece inundado durante el tiempo suficiente para que las arcillas dominen la granulometría, causando que la acumulación de sedimentos sobrepase a los fenómenos erosivos. La dominancia de arcillas en los sedimentos de San Isidro concuerda con depósitos asociados a la planicie costera de inundación con clara influencia continental. La ausencia de microorganismos del zooplancton dentro de los sedimentos sugiere que no han existido las condiciones necesarias para su preservación, o bien que su degradación fue más rápida de lo habitual; esto puede deberse a cambios energéticos en el depósito de sedimentos posiblemente asociados con inundaciones o





**Figura 11.** Imágenes de los componentes de los sedimentos analizados para el núcleo San Isidro Pijijiapan. Se observan los agregados de arcillas color café muy claro distribuidos en las muestras. Los centímetros indican la profundidad a la que fue obtenida la muestra, todas las observaciones se realizaron en aumento de 20x. Abreviaturas: Qz: Cuarzo, Ca: agregados de carbonatos, Ox: agregados oxidados, Bt: Biotitas, Af: Anfibol, Lt: Líticos, Ar: Arcillas.

los años 30 a.C. a 80 d.C., cuando los productos eruptivos sin consolidar del volcán San Antonio se mezclaron con el agua de lluvia formando un lahar que se movió por los ríos Cahuacán, Mixcún-Suchiate e Izapa, los azolvó y causó severos daños a Izapa (Voorhies y Kennett, 1995; Guernsey, 2016; Macías *et al.*, 2018).

Precisamente el sitio de muestreo INIFAP se encuentra dentro de la llanura de inundación del río Mixcún-Suchiate, y el núcleo de sedimentos obtenido abarca los últimos 3,600 años (Hidalgo Juárez, 2021). Este núcleo conserva en sus 20 cm superiores restos de ostrácodos re TRABAJADOS, formando un ensamble de tanatocenosis de alta energía, con características que sugieren que un flujo súbito los removilizó desde su ambiente original y los redepositó en el sitio muestreado. Adicionalmente, la mayoría de las valvas de los ostrácodos se mantuvieron cerradas, indicando la respuesta de los organismos ante un cambio inesperado en su medio ambiente. Al morir y quedar sepultados estos organismos, la valva permaneció articulada e inclusive con restos del sedimento circundante en su interior. Algunos caparazones de

ostrácodos inclusive muestran evidencia de abrasión mecánica como fracturas de impactos ortogonales y pérdida de características superficiales, lo que sugiere que fueron transportados por corrientes rápidas, con una carga sedimentaria elevada y componentes que desgastaron sus superficies. Es probable que este depósito se haya originado por una inundación catastrófica reciente debida al desbordamiento del río Mixcún-Suchiate y ya que las últimas tres erupciones del complejo volcánico Tacaná ocurrieron en los años 1881, 1949 y 1986 (Macías *et al.*, 2015), no se puede descartar que se haya tratado de un fenómeno de lahar, lo que además explicaría el alto grado de erosión que sufrieron las valvas y la cantidad de sedimento atrapado dentro de ellas, así como fuertemente adherido a su exterior, ya que al ser material relativamente caliente puede aglutinarse en los ostrácodos con facilidad.

## Conclusiones

Los sitios estudiados en la Llanura costera de Chiapas responden a las diferentes dinámicas biológicas, climáticas, geológicas dominantes para cada sitio y las cuales determinan las características se-

dimentarias de los depósitos. Chocohuital refleja una dinámica costera muy energética, con escasa preservación de ostrácodos, evidencias de abrasión mecánica en cristales sueltos de minerales y con aportes de partículas costeras en los materiales preservados en los sedimentos. San Isidro Pijijiapan, a pesar de estar en la Planicie de inundación costera, sugiere una dinámica de sedimentación asociada al transporte y depósito de material aluvial y fluvial, a través de los numerosos ríos que descienden desde la Sierra Madre de Chiapas. El sitio INIFAP, aunado a la dinámica fluvial, está fuertemente influenciado por la actividad volcánica del Complejo Volcánico Tacaná, cuyas erupciones constantes en tiempos recientes han detonado fenómenos de lahares de manera continua, los cuales han afectado la fisiografía y biodiversidad local.

La preservación diferencial de los ostrácodos en los sitios estudiados refleja la respuesta de las valvas a las condiciones de sedimentación, principalmente a la energía de transporte y depósito, así como al tipo de sedimento en el que quedan incluidos. Su ausencia en Chocohuital y San Isidro Pijijiapan sugiere un fuerte intemperismo físico en ambos, ocasionando la baja preservación de las valvas. Por otro lado, la presencia de ostrácodos en el sitio INIFAP está asociada a depósitos alóctonos originados por procesos de retrabajamiento, los cuales tienen gran probabilidad de estar relacionados con la generación de lahares recurrentes en las inmediaciones del complejo volcánico Tacaná. Se requieren estudios adicionales para determinar la dominancia de la sedimentación costera *versus* de la sedimentación asociada a desbordamiento de ríos e inundaciones en el pasado en la zona costera Chiapaneca.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la beca derivada del programa de Estancias Posdoctorales por México otorgada por CONAHCyT a Diana Cinthia Soria Caballero, y por el proyecto CIC 2021-2022 otorgado a Gabriela Domínguez Vázquez.

### Referencias

Alongi DM y De Carvalho NA (2008). The effect of the small-scale logging on stand characteristics and soil biogeochemistry

in mangrove forests of Timor Leste. *Forest Ecology and Management* 255:1359-1366.

Armstrong-Altrin JS, Ramos-Vázquez MA, Madhavaraju J, Verma SK, Macías-Martínez K, Martínez-Ruiz D (2022). Quartz grain microtextures in the Boca del Cielo and Chocohuital beaches in the Mexican Pacific, Chiapas state: implication on paleoenvironment. *Arabian Journal of Geosciences* 15(11):1-11.

Bouillon S, Borges AV, Castañeda-Moya E, Diele K, Dittmar T, Duke NC, Kristensen E, Lee SY, Marchand C, Middelburg JJ, Rivera-Monroy VH, Smith TJ, Twilley RR (2008). Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles* 22:GB2013. doi:10.1029/2007GB003052.

Caballero L, Macías JL, García Palomo A, Saucedo R, Borselli L, Sarocchi D, Sánchez-Núñez JM (2006). The September 8–9, 1998 Rain-Triggered Flood Events at Motozintla, Chiapas, Mexico. *Natural Hazards* 39:103-126.

Castillo Santiago MA, Navarrete Gutiérrez DA, García G, Valencia E, Méndez D, Sarabia A, López JL, Díaz Bonifaz D (2003). MORFOPEDOLOGÍA. En: *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Chiapas*. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. p 35-40.

Castillo Santiago MA, Navarrete Gutiérrez DA, García G, Valencia E, Méndez D, Sarabia A, López JL, Díaz Bonifaz D (2003). FRAGILIDAD NATURAL. En: *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Chiapas*. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. p 55-59.

Castillo Santiago MA, Navarrete Gutiérrez DA, García G, Valencia E, Méndez D, Sarabia A, López JL, Díaz Bonifaz D (2003). RIESGOS. En: *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Chiapas*. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. p 81-83.

Castro Aguilar MV (2018). Inundaciones y sus causas en la cuenca del río Pijijiapan. Tesis de Licenciatura. *Instituto de Ciencias Biológicas*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. 48 pp.

Domínguez-Vázquez G, Hidalgo-Juárez G, León-Cortés JL (2023). Pollen rain, vegetation and connectivity in the Tacaná volcano, Southern Mexico. *Palynology* 47(1):2139001. doi: 10.1080/01916122.2022.2139001

Donato DC, Kauffman JB, Kurnianto S, Stidham M, Murdiyarso D (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience* 4:293-297.

Flores-Verdugo FJ, Agráz-Hernández C, Benitez-Pardo D,

- (2007). Ecosistemas acuáticos costeros: Importancia, retos y prioridades para su conservación. En: *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. México DF. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología US. Fish & Wildlife Service, Unidos para la Conservación. A.C. y Escuela de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. 293 pp.
- García G, Castillo Santiago MA, Navarrete Gutiérrez DA, Valencia E, Méndez D, Sarabia A, López JL, Díaz Bonifaz D (2003). RELIEVE. En: *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Chiapas*. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. p 10-14.
- García G, Castillo Santiago MA, Navarrete Gutiérrez DA, Valencia E, Méndez D, Sarabia A, López JL, Díaz Bonifaz D (2003). CLIMA. En: *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Chiapas*. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. p 15-16.
- García-Palomo A, Macías JL, Arce JL, Mora JC, Hughes S, Saucedo R, Espíndola JM, Escobar R, Layer P (2006) Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala. En: Rose WI, Bluth GJS, Carr MJ, Ewert JW, Patino LC, Vallance JW (eds) *Volcanic Hazards in Central America*. Geological Society of America, pp 39-57. doi:10.1130/2006.2412(03)
- Gilman EL, Ellison J Duke NC y Field C (2008). Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. *Aquatic Botany* 89:237- 250.
- Guernsey J, (2016). Water, Maize, Salt, and Canoes: An Iconography of Economics at Late Preclassic Izapa, Chiapas, México. *Latin American Antiquity* 27:340–356.
- Herrera-Silveira J, Comín F y Capurro L (2004). Los usos y abusos de la zona costera en la Península de Yucatán. En: E. Rivera G Villalobos I Azuz. y F. Rosado, eds. *El manejo costero en México. Campeche*: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. p 387-396.
- INEGI (2010). Prontuario de Identificación Geográfica Municipal de los Estados Mexicanos, Pijijiapan y Tuxtla Chico, Chiapas Clave Geoestadística.
- López JL, Castillo Santiago MA, Navarrete Gutiérrez DA, García G, Valencia E, Méndez D, Sarabia A, Díaz Bonifaz D (2003). SUELOS. En: *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Chiapas*. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. p 17-18.
- López JL, Castillo Santiago MA, Navarrete Gutiérrez DA, García G, Valencia E, Méndez D, Sarabia A, Díaz Bonifaz D (2003). VEGETACIÓN. En: *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial de Chiapas*. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. p 19-24.
- Macías JL, Arce JL, Layer PW, Saucedo R, Mora JC (2015). Eruptive History of the Tacaná Volcanic Complex. En: *Active Volcanoes of Chiapas (Mexico) El Chichón and Tacaná, Active Volcanoes of the World*, edited by T. Scholamacchia and José L. Macías. p 115-138. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Macías JL, Arce JL, Capra L, Saucedo R, Sánchez-Núñez JM (2018). Late formative flooding of Izapa after an eruption of Tacaná volcano. *Ancient Mesoamerica* 29(2):361-371.
- Murcia H, Macías JL (2009). Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26:1–17.
- Ortega-Gutiérrez F, Mitre Salazar LM, Roldán-Quintana J, Aranda-Gómez JJ, Morán-Zenteno D, Alaniz-Alvarez S, Nieto-Samaniego AF (1992). Carta geológica de la República Mexicana Escala 1:2,000,000. *Consejo de Recursos Minerales y en el Instituto de Geología de la UNAM*.
- Tovilla-Hernández C (2005). Agonía y desaparición de los ríos y humedales en la costa de Chiapas. *Ecofronteras* 25:5-8.
- Vázquez R, Macías JL, Alcalá-Reygosa J, Arce JL, Jiménez-Haro A, Fernández S, Carlón T, Saucedo R, Sánchez-Núñez JM (2022). Numerical modeling and hazard implications of landslides at the Ardillas Volcanic Dome (Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala). *Natural Hazards* 113(2):1305-1333. doi:10.1007/s11069-022-05348-1.
- Voorhies B y Kennett D (1995). Buried Sites on the Soconusco Coastal Plain, Chiapas, Mexico. *Journal of Field Archaeology* 22:65-79.
- Walters BB, Rönnbäck P, Kovacs JM, Crona B, Hussain SA, Badola RJ, Primavera H, Barbier E, Dahdouh-Guebas F (2008). Ethnobiology, socioeconomics and management of mangrove forests: a review. *Aquatic Botany* 89:220-236.



# Nuevos horizontes: revelando el potencial transformador de la biología sintética

## New horizons: unveiling the transforming potential of synthetic biology

Haidi Medina Martínez<sup>1</sup>, Berenice Yahuaca Juárez<sup>2</sup>, Marina Velarde Sánchez<sup>3</sup>, Liliana Márquez Benavides<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> CIIDIR Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional.

<sup>2</sup> Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>3</sup> Universidad del Oriente de Michoacán.

<sup>4</sup> Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### Historial

Manuscrito recibido: 13 de marzo de 2024

Manuscrito aceptado: 15 de abril de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Liliana Márquez Benavides

e-mail: liliana.marquez@umich.mx

ORCID: 0000-0003-3738-6608

### Resumen

La Biología sintética o BioSin es una disciplina emergente que se emplea para diseñar y construir nuevos componentes, mecanismos y sistemas biológicos, o para rediseñar sistemas biológicos existentes con el fin de dotarlos de cualidades nuevas y mejoradas con un propósito definido. Algunas de sus áreas y campos de aplicación incluyen la medicina, la agricultura y el medio ambiente. La BioSin permite la creación de terapias personalizadas, la producción de ingredientes alimentarios con aportes nutrimentales y la creación de biocombustibles que reducen la huella de carbono y materiales biodegradables. El objetivo de este trabajo es guiar a los lectores a través de la BioSin y algunas de sus aplicaciones actuales para infundir entusiasmo por el potencial transformador de esta disciplina.

**Palabras clave:** bioética, bio-fabricación, biología computacional, edición del genoma, ingeniería metabólica.

### Introducción

En el contexto de la investigación científica, emerge una disciplina que desdibuja los límites entre la biología y la ingeniería abriendo paso hacia perspectivas innovadoras. Se visualiza un mundo donde organismos diseñados a medida sirven como aliados en la lucha contra enfermedades, donde se redefine la frontera de lo posible en el ámbito alimentario y donde las crisis y desastres ecológicos encuentran soluciones (Giménez *et al.*, 2016). Este mundo innovador no es solo una visión utópica, sino una realidad debido a una disciplina conocida

### Abstract

Synthetic Biology or BioSyn is an emerging discipline used to design and build new biological components, mechanisms and systems, or to redesign existing biological systems to provide them with new and improved qualities for a defined purpose. Its areas and fields of application include medicine, agriculture and the environment. BioSyn enables the creation of personalized therapies, the production of food ingredients with nutritional contributions and the creation of biofuels that reduce carbon footprint and biodegradable materials. The aim of this paper is to guide readers through BioSyn and some of its current applications to instill enthusiasm for the transformative potential of this discipline.

**Keywords:** bioethics, bio-manufacturing, computational biology, genome editing, metabolic engineering.

como biología sintética.

El término «biología sintética» (BioSin) se define como una disciplina que se emplea para diseñar y construir nuevos componentes, mecanismos y sistemas biológicos, o para rediseñar sistemas biológicos existentes con el fin de dotarlos de cualidades nuevas y mejoradas (Diéguez, 2016; INCyTu Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión, 2018). La BioSin sirve como base para el desarrollo de metodologías innovadoras destinadas al estudio de la funcionalidad de los sistemas biológicos (Pichardo, 2022). Los sistemas

biológicos sintéticos deben poseer características altamente específicas para ser considerados como tales; por ejemplo, deben ser computacionalmente predecibles, medibles, controlables y transformables, es decir, tener la capacidad de agregar nuevas funciones y/o regular las existentes (Muñoz-Miranda *et al.*, 2019). La BioSin puede ser comparada a un lienzo donde los genes y circuitos interactúan, y el código genético sirve como plataforma para plasmar diseños biológicos intrincados.

La BioSin permite la creación de terapias personalizadas, adaptadas al patrón genético de cada individuo, ofreciendo una esperanza sin precedentes en la lucha contra las aflicciones que han afectado a la humanidad, como el caso de los patógenos bacterianos resistentes a los antimicrobianos, que son una amenaza en aumento a medida que los métodos para combatir infecciones continúan siendo superados por la evolución de los mecanismos de resistencia microbiana. La BioSin se está convirtiendo en una estrategia clave para intentar predecir e inducir nuevos antibióticos naturales (Cook y Stasuli, 2024), es decir, ofrece el poder de vencer a los adversarios más formidables como las bacterias resistentes a los antibióticos, a través de enfoques que prometen remodelar el panorama de la medicina.

Este trabajo tiene como objetivo presentar el fundamento y novedad de la BioSin, señalando sus principios. A su vez, se exploran algunas aplicaciones actuales en el campo de la medicina, así como el horizonte de posibilidades que promete. Al final, se espera que se comprenda el potencial transformador de la biología sintética y su papel como catalizador de la innovación en el ámbito de la medicina.

### **Contexto histórico: orígenes y evolución**

La BioSin evolucionó con el tiempo, aprovechando el propio crecimiento de la investigación científica y los avances tecnológicos. Sus raíces pueden rastrearse hasta los primeros días de la ingeniería genética con la manipulación del ADN en la década de los setenta (Centeno y Gómez-Lee, 2021). Desde entonces el campo ha crecido: los avances en la secuenciación automatizada del ADN,

técnicas de edición genómica y el surgimiento de partes genéticas estandarizadas. Estas piedras angulares han allanado el camino para la síntesis contemporánea de formas de vida y sistemas biológicos que definen la biología sintética en la actualidad.

Uno de los primeros puntos de inflexión en la historia de la biología sintética fue el avance de la ingeniería genética en las décadas de 1960 y 1970. Este período vio el inicio de la manipulación deliberada del ADN con científicos que exploraban la capacidad de modificar genes y transferirlos entre organismos. Uno de los primeros experimentos en la manipulación del ADN fue la investigación realizada por Stanley Cohen, Annie Chang, Herbert Boyer y Robert Helling en 1973. En este experimento se lograron introducir segmentos específicos de ADN en plásmidos y utilizarlos como vehículo para clonar cadenas de ADN precisas dando pie a la técnica de “plásmido recombinante” (Bera, 2009). Los plásmidos recién construidos fueron insertados en *Escherichia coli* (*E. coli*) y resultaron biológicamente funcionales, con propiedades genéticas similares a las moléculas de ADN parentales (Cohen *et al.*, 1973). Este hito marcó el inicio de la ingeniería genética moderna y sentó las bases para el desarrollo de técnicas más avanzadas en el campo, como la clonación de genes y la producción de organismos transgénicos.

Otro hito crucial fue el desarrollo de la secuenciación automatizada de ADN en 1977, mediante la técnica didesoxi enzimática de Sanger y el método de degradación química de Maxam y Gilbert que revolucionó la forma en que los científicos podían leer y comprender la información genética de los organismos (Ansorge, 2009; Pacheco *et al.*, 2015). Esta tecnología permitió un acceso sin precedentes al código genético y allanó el camino para el desarrollo de la secuenciación automatizada con mayor capacidad de resolución (Gómez *et al.*, 2013).

En las décadas siguientes, los avances en técnicas de edición genómica, como CRISPR-Cas9, han llevado la capacidad de manipulación genética a un nivel sin precedentes. En 1987 se realizó el primer descubrimiento en *E. coli* relacionado con la caracterización de un sistema genético específico

denominado «*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*» (CRISPR por sus siglas en inglés) o en español denominado “Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Interespaciadas”, aunque en ese momento no se comprendió completamente su función. Ishino y sus colegas (1987) observaron repeticiones cortas y altamente conservadas de secuencias de ADN, intercaladas con segmentos variables de ADN derivados de fagos y plásmidos en el genoma de *E. coli*. En ese momento, el propósito exacto de estas repeticiones de ADN no estaba claro, y se especulaba que podrían estar involucradas en la reparación del ADN o en la regulación de la expresión génica (Ishino *et al.*, 1987). Este descubrimiento sentó las bases para la investigación posterior que eventualmente condujo al desarrollo de la edición de genomas.

El sistema CRISPR-Cas9 se basa en un mecanismo de defensa natural que se encuentra en bacterias y arqueas. Estos microorganismos utilizan el sistema CRISPR-Cas9 para defenderse de los virus, identificando y cortando el ADN viral invasor. Cas9 se refiere a una enzima llamada «endonucleasa Cas9». CRISPR-Cas9 surgió como una herramienta de edición genética en el año 2012, cuando un equipo liderado por Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier demostraron que el sistema CRISPR-Cas9 podía ser programado para cortar el ADN en lugares específicos (Jinek *et al.*, 2012).

La tecnología CRISPR-Cas9 permite modificar genes de manera específica al dirigir la enzima Cas9 hacia una secuencia de ADN mediante una molécula guía de ARN complementaria. Una vez que Cas9 se une a la secuencia objetivo, corta el ADN y esto puede dar lugar a diferentes resultados, dependiendo de cómo se repare el ADN después del corte (Jinek *et al.*, 2012). Es factible utilizar este proceso para activar o desactivar genes, corregir mutaciones, o incluso insertar genes nuevos en un lugar específico del genoma (Redman *et al.*, 2016). Estas herramientas permiten realizar cambios específicos en el ADN con una precisión sin precedentes, abriendo nuevas posibilidades en la ingeniería de organismos y sistemas biológicos, como modificar embriones o aplicaciones clínicas en

el tratamiento de enfermedades infecciosas como el VIH (Yin *et al.*, 2014; Liang *et al.*, 2015). Además, el surgimiento de elementos genéticos estandarizados ha sido fundamental para el desarrollo de la biología sintética. Estos componentes predefinidos, como promotores y genes reporteros, permiten construir sistemas biológicos complejos de manera más eficiente y predecible, facilitando la ingeniería de nuevas funciones.

### **El arte y la ciencia de la biología sintética**

La BioSin, es una disciplina tan revolucionaria que se caracteriza por su maestría en la manipulación de los bloques fundamentales de la vida a nivel molecular, que a menudo desafía una fácil categorización. En otras palabras, la BioSin se define por su fusión entre la ingeniería genética y la ciencia de la ingeniería. Su enfoque ya no se limita a la observación de procesos naturales en los organismos vivos, sino que busca diseñar y replicar esos procesos en sistemas sintéticos, es decir, creados artificialmente (biomimética). En este campo se busca transformar la biología en una disciplina que pueda ser diseñada para cumplir con las expectativas y necesidades humanas. A pesar de su naturaleza elemental, las células representan sistemas intrincados y sofisticados en el reino de la vida. Requieren un delicado equilibrio de condiciones y componentes para ejecutar procesos altamente complejos, fundamentales para su subsistencia y reproducción. Aunque la creación artificial de una célula viva completamente autónoma sigue siendo un desafío pendiente, los científicos han logrado emular ciertas estructuras y procesos celulares en el laboratorio. En el campo emergente de la biomimética ascendente, también conocida como *bottom-up biomimicry*, los avances más notables representan una prometedora incursión hacia la comprensión y la recreación controlada de la complejidad celular. La biomimética sintética hasta hoy cubre cuatro áreas: la estructura celular, las reacciones biológicas para la producción de energía, la motilidad y la comunicación (Wang *et al.*, 2020). Sin embargo, las fronteras entre la BioSin y otras ramas científicas, como las ciencias computacionales y la ingeniería metabólica, están cada vez más difusas. De hecho, al ir creciendo, la interacción de

la biología sintética con otras disciplinas (ej. bioinformática, química, matemáticas, etc.) muestra un campo de estudio interdisciplinario y en crecimiento que está redefiniendo los límites tradicionales de la ciencia (**Figura 1**). Esto es crucial para el desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones a problemas complejos en salud, agricultura, y más. La integración de la biología sintética con otras disciplinas permite innovar y mejorar las aplicaciones existentes, además de abrir la puerta a nuevos descubrimientos. Los avances en tecnologías exponenciales, especialmente en inteligencia artificial (IA), proporcionan a los biólogos una combinación única de eficiencia y velocidad. Aunque estos avances abren nuevas oportunidades, también plantean importantes interrogantes bioéticas y filosóficas sobre los límites de la vida y nuestra propia existencia.

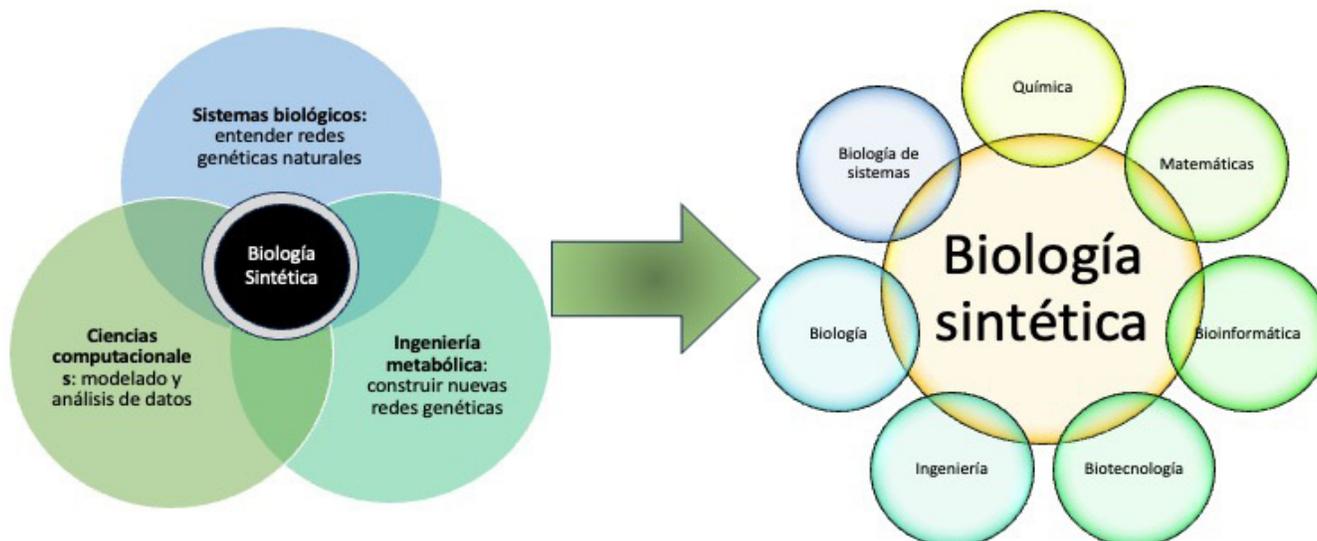
La relación entre la biología y la ingeniería, transformando los planos de la naturaleza en construcciones hechas por el hombre a medida, abandona el enfoque de experimentación tradicional (Sánchez-Pascuala y de Lorenzo, 2018). En su manifestación más profunda, implica la creación de sistemas biológicos completamente novedosos que desafían la categorización convencional. Estos no son simplemente adaptaciones de organismos existentes, sino más bien el nacimiento de formas de vida con atributos diseñados con precisión (Powell, 2018). Estos pueden ser organismos

artificiales o secuencias sintéticas realizados de manera mecánica y automatizada por máquinas en laboratorios de secuencias sintéticas (Pichardo, 2022). Este proceso implica una cuidadosa selección de componentes moleculares y su ensamblaje para lograr el efecto deseado, de manera similar a cómo un artista selecciona pigmentos y los combina en un lienzo para crear una obra de arte.

### Ingeniería molecular: síntesis de ADN y circuitos genéticos

En el centro de la biología sintética está la ingeniería molecular, donde la síntesis y manipulación de ADN son las herramientas. Aquí, se construyen y modifican las secuencias genéticas, fabricando moléculas de ADN a medida con funciones deseadas (Salgado *et al.*, 2024). Estas secuencias no están limitadas por las restricciones de la evolución natural, lo que permite forjar circuitos genéticos que realizan tareas específicas, como detectar señales ambientales o producir proteínas terapéuticas bajo demanda (Kolodziejczyk y Kagansky, 2017).

La síntesis de ADN es un aspecto fundamental de la ingeniería molecular en la BioSin. Con avances en las técnicas de síntesis de ADN, como la síntesis química y la síntesis por reacción en cadena de la polimerasa (PCR), se pueden fabricar secuencias genéticas específicas de manera eficiente y precisa. Estas secuencias pueden codificar proteínas



**Figura 1.** Evolución de la biología sintética y sus límites con distintas disciplinas.

específicas, o incluso recrear genomas completos.

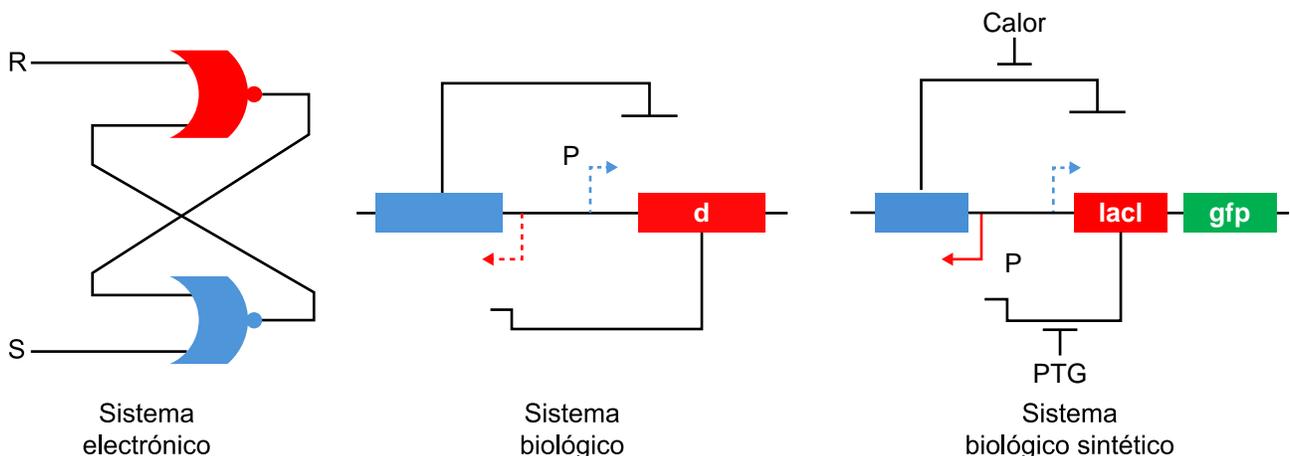
Una de las aplicaciones más emocionantes de la ingeniería molecular en la BioSin es la creación de circuitos genéticos (**Figura 2**). Un circuito genético integra sistemas electrónicos y biológicos logrando la interacción entre la biotecnología y la ingeniería electrónica. Los componentes del circuito son: a) un sistema biológico y b) un sistema electrónico. El sistema biológico comprende sensores biológicos (usualmente proteínas) que detectan señales específicas dentro o fuera de la célula, como pH, temperatura, o la presencia de un compuesto químico. La maquinaria celular utiliza las instrucciones genéticas modificadas para responder a las señales detectadas por los sensores. Esto puede incluir la producción de proteínas, la regulación de genes, o la modificación de procesos celulares. La contraparte, que involucra los sistemas electrónicos, también cuenta con sensores, que suelen ser dispositivos como microchips o biosensores que pueden detectar cambios en el ambiente celular o en el sistema biológico y convertirlos en señales eléctricas. El procesador y los actuadores reciben las señales eléctricas de los sensores y las procesan para enviar comandos de vuelta al sistema biológico, a menudo mediante la liberación controlada de moléculas que pueden alterar la actividad celular. El sistema electrónico puede recibir información sobre las respuestas del sistema biológico y ajustar sus acciones futuras, creando un bucle de retroalimentación dinámico y adaptable.

Estos circuitos están diseñados para realizar tareas específicas dentro de una célula, como detectar señales ambientales o producir proteínas terapéuticas bajo demanda (Kolodziejczyk y Kagansky, 2017). Al combinar elementos genéticos como promotores, genes y elementos de control, es posible diseñar circuitos genéticos complejos que funcionan como circuitos electrónicos en una célula viva. Desde la síntesis de ADN hasta la edición genética y la creación de circuitos genéticos, estas técnicas están abriendo nuevas fronteras en la investigación biomédica, la biotecnología y la biología sintética, ofreciendo un potencial transformador en diversos campos de aplicación.

### La biología sintética en el campo de la medicina

La BioSin presenta oportunidades innovadoras en aplicaciones médicas. El potencial de innovación de este campo es particularmente prometedor para abordar desafíos médicos persistentes a través de enfoques inventivos (**Figura 3**).

Una aplicación significativa de la BioSin reside en la terapéutica personalizada. Al aprovechar la ingeniería genética, los tratamientos pueden adaptarse a pacientes individuales según sus perfiles genéticos y características de enfermedades. Este enfoque ofrece la posibilidad de terapias más precisas y efectivas con menos efectos colaterales adversos. Por ejemplo, las células inmunitarias modificadas genéticamente capaces de dirigirse y eliminar células cancerosas prometen avanzar en la inmunoterapia.



**Figura 2.** Circuitos genéticos. El sistema electrónico se muestra como un *set/reset latch* y el sistema biológico sintético como un “*toggle-switch*” de proteínas que pueden inhibir la expresión de un gen



**Figura 3.** Aplicaciones de la BioSin en el campo de la medicina y los farmacéuticos.

pia del cáncer (Li *et al.*, 2024). También, la BioSin está lista para revolucionar la medicina regenerativa, ya que se están explorando formas de diseñar tejidos y órganos utilizando componentes biológicos sintéticos para reemplazar tejidos dañados o enfermos. Estos tejidos diseñados podrían servir como sustitutos funcionales para trasplantes o reparaciones, aliviando potencialmente la escasez de órganos donados y mejorando los resultados para los pacientes.

Los circuitos biológicos sintéticos diseñados para detectar señales moleculares o biomarcadores específicos permiten el desarrollo de biosensores para la detección temprana de enfermedades y el monitoreo del tratamiento. Los biomateriales basados en BioSin tienen potencial en la ingeniería de tejidos, la administración de medicamentos y el de-

sarrollo de dispositivos médicos, ofreciendo soluciones para la cicatrización de heridas y sistemas de liberación de medicamentos controlados.

En años recientes, el rápido desarrollo de tecnologías de vanguardia en química, biología, materiales y medicina ha llevado al uso generalizado de diversos sistemas de entrega dirigida de fármacos basados en nanobiología en el diagnóstico de enfermedades y la terapia de precisión personalizada. La tecnología de la BioSin permite la fusión inteligente de células de chasis (máquinas mínimas autorreplicantes que pueden adaptarse para la producción de productos químicos específicos), bacterias y sus derivados modificados con nanomateriales. Estos sistemas combinan orgánicamente las funcionalidades de ambos materiales, facilitan avances significativos y la optimización de funciones bioló-

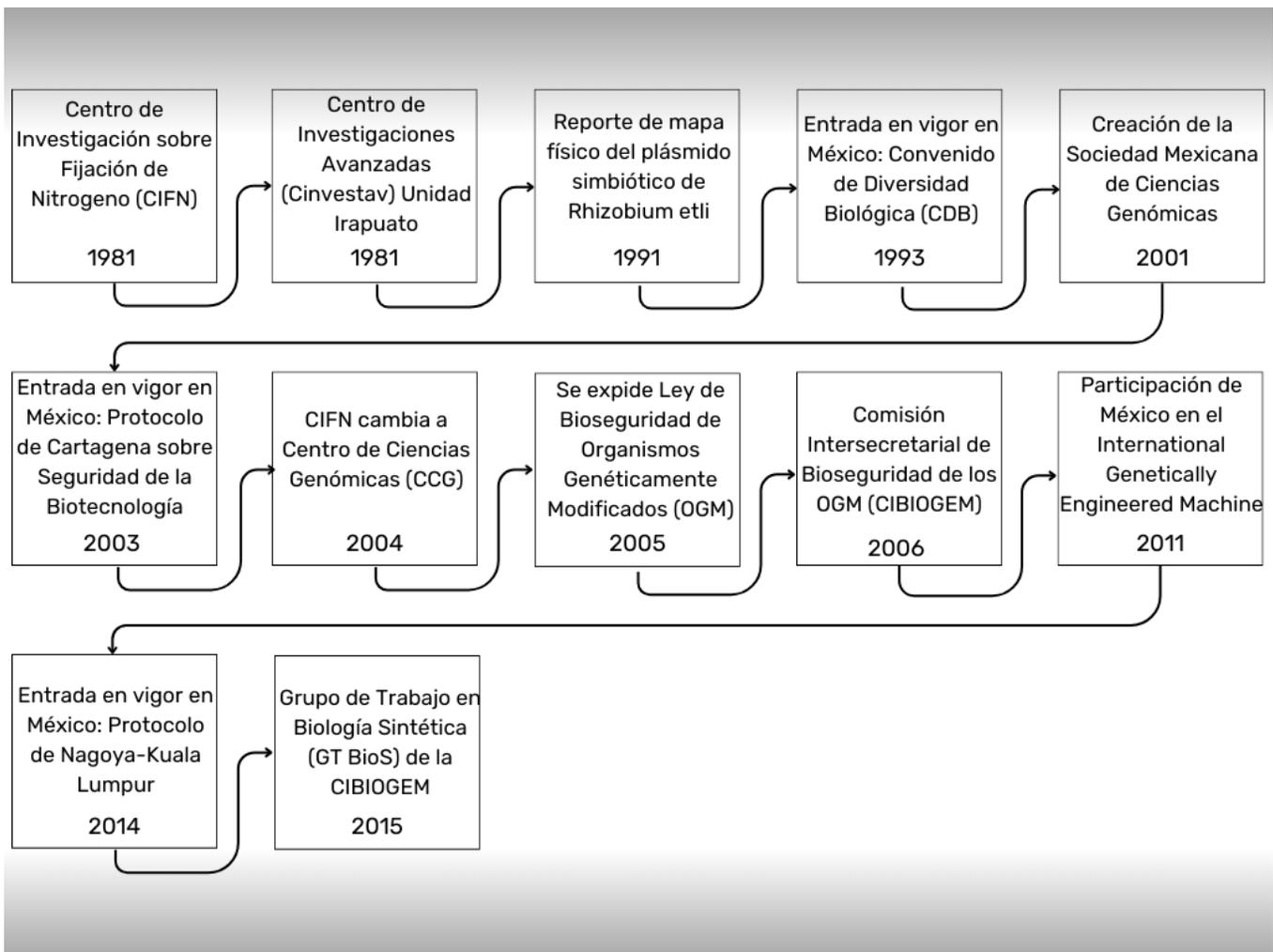
gicas. Además, guiada por la biología sintética, el autoensamblaje de nanoensamblajes modulares con funciones biocatalíticas o responsivas imita características esenciales de las células vivas, ofreciendo conceptos de diseño novedosos para la construcción de células artificiales.

Los sistemas de entrega-dirigida de fármacos tradicionales utilizan las propiedades mecánicas, químicas y biológicas únicas de los nanomateriales para encapsular agentes biológicos o medicamentos. Si bien estos sistemas han abordado parcialmente problemas como la rápida eliminación sanguínea, la toxicidad sistémica, los efectos secundarios y la escasa estabilidad de los medicamentos cuando se administran de forma aislada, su síntesis a menudo implica materiales crudos, disolventes y moléculas modificadoras con posibles problemas de biosegu-

ridad y biocompatibilidad. La integración de la BioSin y los nanomateriales ha surgido como una tendencia fundamental en el avance de los sistemas de entrega de medicamentos de próxima generación. Las nuevas estrategias permiten que los sistemas biológicos existentes adquieran funciones completamente nuevas mediante la construcción de componentes sintéticos con redes genéticas, metabólicas o de bioseñalización predecibles y controlables basadas en las propiedades y funciones actuales de los organismos naturales.

### Perspectivas de la biología sintética para México y América Latina

Los avances de la BioSin en México (**Figura 4**) se remontan al año 1981 con la creación de dos de los principales centros de investigación que



**Figura 4.** Avances de BioSin en México.

a la actualidad son pioneros en la investigación científica: el Centro de Investigación de Fijación de Nitrógeno (CIFN) y el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav) Unidad Irapuato (CCG, 2021; Cinvestav, 2022). En la década siguiente investigadores del CIFN reportaron el mapa físico del plásmido simbiótico de *Rhizobium etli*, el cual fue el primer proyecto de México sobre secuenciación e interpretación de la información genómica a gran escala (CCG, 2018).

Dos años más tarde, con la firma por parte de México, entra en vigor el Convenio de Diversidad Biológica en nuestro país, este tiene por objeto la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y el intercambio justo y equitativo de los beneficios que surgen por el uso de los recursos genéticos (CIBIOGEM, 2016).

A principios de la década de los 2000, se crea en México la Sociedad Mexicana de Ciencias Genómicas, como la primera sociedad enfocada al rubro (CCG, 2018). Posteriormente, en 2003, entra en vigor en el país el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología (PCB), el cual emana del CBD y tiene por objetivo garantizar la protección de la biodiversidad en la manipulación y utilización de los Organismos Genéticamente Modificados (OGM) resultantes de las investigaciones y proyectos de biotecnología, a su vez este protocolo busca una utilización sostenible y que se enfoque en los movimientos transfronterizos de los OGM's (CIBIOGEM, 2016). En el 2004, por acuerdo universitario el CIFN cambia de denominación y pasa a ser el Centro de Ciencias Genómicas (CCG), con lo cual se puede decir que el camino de la BioSin en nuestro país comienza a tomar forma (CCG, 2018).

Durante el 2005 y como resultado de la entrada en vigor tanto del CBD y el PCB en México, se expide la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados, con el objeto de regular las actividades de experimentación, liberación, pruebas, comercialización, exportación e importación de OGM's. Con esta normativa se da paso a la instauración de un organismo intersecretarial, la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los

Organismos Genéticamente Modificados (CIBIOGEM), la cual formula, coordina y establece regulaciones a las actividades de los OGM (Congreso de la Unión, 2005; DOF, 2007).

Para el 2011 en México las diversas instituciones educativas como la UNAM, el Tecnológico de Monterrey, y la Universidad Autónoma de Nuevo León inician el proyecto *International Genetically Engineered Machine (iGEM)*, en el cual brindan a grupos de estudiantes equipo e instrumentos para que puedan desarrollar proyectos de sistemas biológicos con los cuales competir y poder ganar un reconocimiento, con ello se busca incentivar la investigación de la biología sintética (iGEM, 2024). Con la adición del Protocolo de Nagoya sobre acceso a los Recursos Genéticos y Participación Justa y Equitativa en los Beneficios que se Deriven de su utilización como complemento al CBD y su entrada en vigor a México en 2014 (CIBIOGEM, 2016), la CIBIOGEM solicitó la conformación del Grupo de Trabajo en Biología Sintética conformado por investigadores relacionados con biología sintética, que brindaran información técnica especializada necesaria ante las solicitudes de reportes y estado de la aplicación de los protocolos en México (CIBIOGEM, 2023).

### **Consideraciones bioéticas en el campo de la biología sintética**

Teniendo en claro los diversos elementos y aspectos involucrados en la BioSin y su impacto sobre la vida, es importante cuestionarnos los posibles riesgos que esta herramienta tan maravillosamente prometedora pueda tener, bajo la consideración que toda innovación de carácter científico y tecnológico no solamente implica beneficios sino también peligros y riesgos en términos de bioseguridad (Murray, 2023). Así, la bioética juega un papel preponderante entre los riesgos y los beneficios asociados a esta tecnología emergente. Por un lado, se enfatiza el potencial positivo de la BioSin para resolver problemas que son sustanciales para la humanidad: la generación de fármacos, alimentos, biocombustibles y alternativas ecológicas a los productos derivados del petróleo, etc. No obstante, se alerta sobre riesgos sustanciales, especialmente

en lo que respecta a la posible creación de patógenos, sin dejar de lado el impacto ambiental y las cuestiones relacionadas con la injusticia distributiva en los servicios de salud pública, entre otros. Otra área crítica es la aplicación de un régimen de propiedad intelectual a los OGM, como lo evidencia la preocupación por las patentes de semillas de cultivos transgénicos (López-Méndez, 2023) o la biopiratería. Finalmente, no podemos pasar por alto la posibilidad de que esta técnica sea aplicada en humanos, lo que plantea importantes desafíos éticos y sociales.

Existe la incertidumbre latente por la bioseguridad o bien denominada por sus preocupantes consecuencias como “bioerror”, ya que implica la creación y liberación involuntaria de organismos patógenos (López-Méndez, 2023) o voluntaria, conceptualizada como bioterrorismo (Garfinkel *et al.*, 2007), referido al empleo de microorganismos (virus y bacterias) y agentes bioactivos (toxinas), con el objetivo de inducir enfermedades con fines bélicos, afectar a la población civil directamente o a través de la contaminación de las fuentes de agua y alimentos (López-Muñoz *et al.*, 2021). En las últimas cuatro décadas se han presentado casos como los ocurridos en 1984 y 1990 de envenenamiento con *Salmonella*, *Bacillus anthracis* y toxina botulínica a comunidades por parte de agrupaciones delictivas. En el 2001 se registró el ataque con esporas de *Bacillus anthracis* mediante envíos postales, posterior al atentado de las torres gemelas. La respuesta a estos hechos incluyó la resolución 1540 del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas en 2004 que insta a los países miembros a tomar medidas para la prevención en la fabricación, adquisición y uso de armas biológicas (López-Muñoz *et al.*, 2021) entre otras resoluciones de carácter ético y protocolos de seguridad.

Planteemos también la inquietud sobre la seguridad de los organismos modificados por BioSin, especialmente en contextos como la recuperación ambiental donde la fuga de estos organismos podría presentar riesgos desconocidos. En este sentido, aunque estamos familiarizados con los OGM, en los que el ADN se intercambia entre especies, los organismos sintéticos representan una

forma diferente de vida en la que el ADN no se extrae de organismos vivos, sino que se construye de manera artificial. Esta capacidad permite diseñar secuencias de ADN que no tienen equivalentes naturales conocidos e incluso, desarrollar tipos de ADN completamente nuevos.

En la actualidad, no existen protocolos establecidos para evaluar las implicaciones de seguridad de estas secuencias completamente nuevas. A diferencia del proceso relativamente lento de transferencia de genes entre especies (conocido como transgénicos), la construcción de ADN sintético es más rápida y económica, lo que podría dar lugar a una proliferación de formas de vida artificialmente diseñadas, todas con impactos impredecibles en el medio ambiente y la biodiversidad (Pons-Rafols, 2021). Ejemplo de ello, es la modificación genética a cultivos como la soya en el intento de acelerar su cultivo, con la finalidad de cubrir el requerimiento alimenticio del ganado para consumo humano, esta modificación conseguiría el desarrollo de monocultivos, que en consecuencia podrían provocar esterilidad de la tierra y afectar el medio ambiente (López-Méndez, 2023).

Otro punto importante que plantea preocupaciones éticas y de seguridad es, por un lado, la falta de reconocimiento justo sobre la propiedad intelectual de las creaciones a través de esta herramienta y que derivado de ello se imponga como se mencionó con anterioridad, la injusticia distributiva, siendo unos cuantos quienes tengan acceso a los beneficios que plantea la BioSin. Por otro lado, se encuentra la posibilidad implícita de que el uso de la BioSin facilite la biopiratería, comprendida como el acceso no autorizado, la apropiación o explotación de recursos biológicos y conocimientos tradicionales asociados, sin el consentimiento o compensación adecuados a las comunidades indígenas o locales que son propietarias de esos recursos (Wynberg, 2023). En el contexto de la BioSin, algunas preocupaciones específicas planteadas son: *Apropiación de secuencias genéticas* que deriven de organismos que son patrimonio de comunidades específicas; *Uso de recursos naturales locales* como la sustracción de organismos de la biodiversidad local

para extraer información genética útil sin la debida consideración de los derechos y la compensación a las comunidades locales; *Uso indebido de conocimientos tradicionales*, preocupación que radica en que los conocimientos científicos y tradicionales de las comunidades indígenas sean utilizados sin respetar los derechos y la contribución de las comunidades originarias (Ocman, 2011).

Además, si bien se reconoce que la BioSin podría desempeñar un papel crucial en la disminución de los gases de efecto invernadero, mediante la generación de biocombustibles o la creación de organismos absorbedores de carbono, así como en el ámbito de la diversidad biológica, al poseer el potencial de recuperar especies extintas o de generar nuevas con propiedades distintivas surge la preocupación de que los organismos creados causen daños directos o indirectos a la diversidad biológica. Existen dos convenios internacionales: el Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y el Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB). Aun cuando estos convenios surgieron antes de BioSin, ambos se basan en los principios de desarrollo sostenible, preocupación en la acción humana que afecta al clima o la diversidad biológica y la equitativa distribución de las cargas y beneficios entre países. La práctica de la BioSin ha sido incorporada gradualmente por CBD en sus disposiciones, cuyo eje rector radica en el reconocimiento del derecho soberano de los Estados para explotar sus propios recursos conforme a su política ambiental, con la obligación de evitar perjuicios al medio ambiente de otros Estados (Bellver-Capella, 2016).

La ética en la BioSin se encuentra ante el desafío de equilibrar los beneficios potenciales con la gestión de peligros y riesgos inherentes, tanto en seguridad como impacto social y económico (Murray, 2023). Estas consideraciones éticas resultan fundamentales para orientar el desarrollo responsable y la implementación de la BioSin. En México, existen más de 90 empresas con giro biotecnológico en las áreas de agricultura, alimentos, medio ambiente, salud y otros giros tales como desarrollo de cosméticos, aditivos alimentarios, enzimas, pigmentos, etc. La regulación sobre la bioseguridad de las prácticas

de estas empresas recae en diversas Secretarías: la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader) y la Secretaría de Salud (SSA), además de la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad y Organismos Genéticamente Modificados (Cibiogem) (López-Méndez, 2023).

## Conclusiones

En el futuro, la biología sintética podría abrir la puerta a un amplio espectro de posibilidades, desde la creación de organismos genéticamente modificados hasta proyectos de terraformación. Sin embargo, junto con estos avances prometedores, también surgen preocupaciones del potencial uso malintencionado de esta tecnología en términos de bioseguridad, incluyendo posibles escenarios de bioterrorismo. Es imperativo que tomemos decisiones éticas y responsables para guiar el desarrollo y la aplicación de la biología sintética, asegurando que sus beneficios sean maximizados y sus riesgos minimizados para el bienestar de la humanidad y el medio ambiente.

## Referencias

- Ansorge WJ (2009) Next-generation DNA sequencing techniques. *New Biotechnology* 25 (4):195-203. doi:10.1016/j.nbt.2008.12.009
- Bellver Capella V (2016). Biología sintética: contexto jurídico y políticas públicas. *Isegoría* 55: 637-657. doi:10.3989/isegoria.2016.055.12
- Bera RK (2009). The story of the Cohen-Boyer patents. *Current Science* 96(6): 760-763. <http://www.jstor.org/stable/24104507>
- CCG (2018). Nuestra Historia: de Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno (CIFN) a Centro de Ciencias Genómicas (CCG). <https://www.ccg.unam.mx/acerca-historia/>
- CCG (31 de marzo de 2021). *40 aniversario Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno*. <https://www.ccg.unam.mx/noticias/40-aniversario/>
- Centeno JP, Gómez-Lee MI (2021). Intersecciones entre lo digital y lo biológico: una reflexión en torno a dos generaciones de biotecnología disruptiva. En Henao JC y Pinzón Camargo MA (Eds.) *Disrupción tecnológica, transformación digital*

y sociedad. Tomo I, ¿Cuarta revolución industrial?: contribuciones tecnosociales para la transformación social. Bogotá: Universidad Externado de Colombia. 2021. pp. 663-696.

CIBIOGEM (2016). Análisis sobre la integración de políticas en bioseguridad de organismos genéticamente modificados y de acceso a recursos genéticos en México. <https://conahcyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/proyecto-piloto/docs/analisis-integracion-politicas-bioseguridad.pdf>

CIBIOGEM (2023). Grupo de trabajo de biología sintética. <https://conahcyt.mx/cibiogem/index.php/comunicacion/inf-grupos-trabajo/gt-bios>

Cinvestav (08 de noviembre de 2022). *Cinvestav Irapuato: Historia*. <https://portal.cinvestav.mx/ira/conocenos/historia>

Cohen SN, Chang AC, Boyer HW, Helling RB (1973). Construction of biologically functional bacterial plasmids In Vitro. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 70(11):3240-3244. doi:10.1073/pnas.70.11.3240

Congreso de la Unión. (18 de marzo de 2005). Ley de bioseguridad de organismos genéticamente modificados. Diario Oficial de la Federación 18/03/05. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBOGM.pdf>

Cook GD, Stasulli NM (2024) Employing synthetic biology to expand antibiotic discovery. *SLAS Technology* 29(2):100120. doi:10.1016/j.slast.2024.100120

Diario Oficial de la Federación (DOF) (05 de diciembre de 2007). Acuerdo por el que se expiden las Reglas de Operación de la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5009244&fecha=05/12/2007#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5009244&fecha=05/12/2007#gsc.tab=0)

Diéguez A (2016). La biología sintética y el imperativo de mejoramiento. *Isegoría* 55:503–528. doi:10.3989/isegoria.2016.055.06

Garfinkel MS, Endy D, Epstein GL, Friedman RM (2007). Synthetic genomics: Options for governance. *Biosecurity and bioterrorism: biodefense strategy, practice, and science* 5(4):359-362. doi:10.1089/bsp.2007.0923

Giménez C, Curti LA, Pereyra-Bonnet F (2016). Dos herramientas de la biología sintética. *Rev. Hosp. Ital. B. Aires* 36(3):124-128. [https://instituto.hospitalitaliano.org.ar/multimedia/archivos/noticias\\_attachs/47/documentos/26311\\_124-128-HI3-8-Gimenez-B.pdf](https://instituto.hospitalitaliano.org.ar/multimedia/archivos/noticias_attachs/47/documentos/26311_124-128-HI3-8-Gimenez-B.pdf)

Gomez-Hinostroza ES, Gurdo N, Alvan Vargas MVG, Nikel PI, Guazzaroni ME, Guaman LP, Castillo Cornejo DJ, Platero

R, Barba-Ostria C (2023). Current landscape and future directions of synthetic biology in South America. *Frontiers in bioengineering and biotechnology* 11:1069628. doi:10.3389/fbioe.2023.1069628

Gómez Meda BC, Zuñiga González GM, Vera Cruz JM y Álvarez Rodríguez BA (2013). Capítulo 17: Secuenciación del ADN y microarreglos. En Salazar Montes A, Sandoval Rodríguez A y Armendáriz Borunda J (Eds.), *Biología Molecular. Fundamentos y aplicaciones en las ciencias de la salud*. México. McGrawHill.

iGem (2024). iGem 2024 Competition. <https://competition.igem.org/>

INCyTU (Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión) (julio de 2018). *Nota-INCyTU-BioS: Biología Sintética*. (Número 021). [https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCyTU\\_18-021.pdf](https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCyTU_18-021.pdf) [Consultado el 06 de febrero de 2024].

Ishino Y, Shinagawa H, Makino K, Amemura M, Nakata A (1987). Nucleotide sequence of the iap gene, responsible for alkaline phosphatase isozyme conversion in *Escherichia coli*, and identification of the gene product. *Journal of Bacteriology* 169(12):5429-5433. <https://journals.asm.org/doi/epdf/10.1128/jb.169.12.5429-5433.1987>

Jinek M, Chylinski K, Fonfara I, Hauer M, Doudna JA, Charpentier E (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science (New York, N.Y.)* 337(6096):816–821. doi:10.1126/science.1225829

Kolodziejczyk B, Kagansky A (2017). *Consolidated G20 synthetic biology policies and their role in the 2030 Agenda for Sustainable Development*. G20 INSIGHTS. [Archivo PDF] <http://www.g20-insights.org/>

Li Y, Wang Y-N, Luo Y-G, Yang H, Ren J, Li X (2024) Advances in synthetic biology-based drug delivery systems for disease treatment. *Chinese Chemical Letters* 35(11):109576. doi:10.1016/j.ccllet.2024.109576

Liang P, Xu Y, Zhang X, Ding C, Huang R, Zhang Z, Lv J, Xie X, Chen Y, Li Y, Sun Y, Bai Y, Songyang Z, Ma W, Zhou C, Huang J (2015) CRISPR/Cas9-mediated gene editing in human triploid zygotes. *Protein & Cell* 6(5):363-372. doi:10.1007/s13238-015-0153-5

López Méndez LA (2023) La influencia del diseño inteligente en la legislación de la biología sintética en México. *Revista de Filosofía Universidad Iberoamericana* 55(155):52-70. doi:10.48102/rdv.v55i155.182

López-Muñoz F, Salas-Moreno P, Montero-Sánchez MA, De-

la-Puente-Mora-Figueroa I, Suárez-Muñoz A, García-Crespín JF, Díaz-Muñoz F (2021) Amenazas biológicas intencionadas: implicaciones para la Seguridad Nacional. *Sanidad Militar* 77:98-105. doi:[10.4321/s1887-85712021000200006](https://doi.org/10.4321/s1887-85712021000200006)

Muñoz-Miranda LA, Higuera-Ciapara I, Gschaedler-Mathis AC, Rodríguez-Zapata LC, Pereira-Santana A, Figueroa Yáñez LJ (2018) Brief description of Synthetic Biology and the importance of its relationship with other disciplines. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica* 40(1):1-7. doi:[10.17488/RMIB.40.1.9](https://doi.org/10.17488/RMIB.40.1.9)

Murray TH (2023). La ética y la biología sintética: cuatro corrientes, tres informes. Edita: Fundació Víctor Grífols i Lucas. c/ Jesús i Maria, 6 - 08022.

Ocman Azueta C (2011). Redes de cooperación en América del Norte y Europa: patentes biotecnológicas y conocimiento tradicional. En Antal E y Aroche Reyes F (Eds.) *Cooperación en Ciencia y Tecnología en América del Norte y Europa*. México. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Centro de Investigaciones sobre América del Norte (CISAN). pp. 137-147.

Pacheco Bautista D, González Pérez M, Algreto Badillo I (2015). De la secuenciación a la aceleración hardware de los programas de alineación de ADN, una revisión integral. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica* 36(3):259-277. doi:[10.17488/RMIB.36.3.6](https://doi.org/10.17488/RMIB.36.3.6)

Pichardo Servín J (2022). *La construcción socio-técnica de la biología sintética en México: entre la apropiación privada*

y social del conocimiento. [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Metropolitana (México)]. p. 235. <http://hdl.handle.net/11191/8892>

Pons Rafols X (2021). Biología sintética y derecho internacional: débiles consensos ante desafíos inmensos. *Revista Española de Derecho Internacional* 73(2):1-26.

Powell K (2018). How biologists are creating life-like cells from scratch. *Nature* 563:172-175 doi:[10.1038/d41586-018-07289-x](https://doi.org/10.1038/d41586-018-07289-x)

Redman M, King A, Watson C, King D (2016). *What is CRISPR/Cas9? Archives of Disease in Childhood - Education & Practice Edition* 101(4):213–215. doi:[10.1136/archdischild-2016-310459](https://doi.org/10.1136/archdischild-2016-310459)

Sánchez-Pascuala A, de Lorenzo Prieto V (2018). La biología sintética como motor de la bioeconomía y de la cuarta revolución industrial. En Aguilar A, Ramón D y Egea FJ (Eds.), *Bioeconomía y desarrollo sostenible. Mediterráneo económico*. pp. 183-201). Editorial Cajamar. <https://publicacionescajamar.es/wp-content/uploads/2018/06/31-796.pdf>

Wang L, Song S, Van Hest J, Abdelmohsen L, Huang X, Sánchez S (2020). Biomimicry of cellular motility and communication based on synthetic soft-architectures. *Small* 16:1907680. doi:[10.1002/sml.201907680](https://doi.org/10.1002/sml.201907680)

Wynberg R (2023). Biopiracy: Crying wolf or a lever for equity and conservation? *Research Policy* 52(2):104674 doi:[10.1016/j.respol.2022.104674](https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104674)



# Levaduras del género *Pichia* y su uso potencial en el desarrollo biotecnológico

## The yeast genus *Pichia* y their potential use in biotechnological development

Ana Karen Calderón Ordaz<sup>1</sup>, Juan Carlos González Hernández<sup>2</sup>, María del Carmen Chávez Parga<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia 403, Morelia, Michoacán, 58000, México.

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, Avenida Tecnológico 1500, Morelia, Michoacán, 58120, México.

### Historial

Manuscrito recibido: 25 de marzo de 2024

Manuscrito aceptado: 15 de abril de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Ma. del Carmen Chávez Parga

e-mail: cparga@umich.mx

ORCID: 0000-0003-2138-7008

### Resumen

Las levaduras son hongos que utiliza el hombre desde la antigüedad, entre las que destaca el género *Pichia* como organismos modelo para la biosíntesis de productos valiosos y su uso en la biotecnología. Esta revisión recopila información de los avances y desafíos de la última década en el uso de levaduras del género *Pichia*, sus capacidades biotecnológicas y para la consecución de bioproductos y polioles. También se discuten soluciones innovadoras para la obtención de productos metabólicos con aplicaciones industriales que involucran la ingeniería de procesos. En general, esta revisión aborda un panorama del potencial biotecnológico de las levaduras del género *Pichia*, que incluye perspectivas a futuro y preguntas abiertas que aún necesitan respuesta.

**Palabras clave:** Arabitol, bioproductos, género *Pichia*, levaduras, polioles.

### Introducción

Las levaduras son microorganismos unicelulares de forma ovalada, de aproximadamente 10 µm de tamaño, de color blanco o incoloras y representan a un grupo heterogéneo dentro del reino fungi. Su interés se centra en las aplicaciones ecológicas y sostenibles dentro de los procesos comerciales e industriales. Además, destacan por su facilidad de cultivo y reproducción (Tullio, 2022). Los estudios que proponen a las levaduras como biofábricas para la obtención de productos naturales y sus derivados se acrecientan debido a que superan a otras especies,

### Abstract

Yeasts are fungus that man has used since ancient times, among which the *Pichia* genus stands out as model organisms for the biosynthesis of valuable products and is also used in biotechnology. This review compiles information on the advances and challenges of the last decade in using yeasts of the genus *Pichia*, their biotechnological capabilities, and to obtain bioproducts and polyols. Innovative solutions for obtaining metabolic products for industrial applications involving process engineering are also discussed. Overall, an overview is provided of the biotechnological potential of yeasts of the genus *Pichia*, including future perspectives and open questions that still need to be answered.

**Keywords:** Arabitol, bioproducts, genus *Pichia*, polyols, yeasts.

bacterianas y eucariotas, para el bioprocesamiento (Shrivastava et al., 2023). También resaltan por su capacidad para producir metabolitos secundarios, enzimas y una amplia gama de compuestos que satisfacen las demandas actuales de forma sostenible (Rangel et al. 2020).

Nandy y Srivastava (2018) recopilaron información que demuestra el potencial de las levaduras, tanto convencionales como no-convencionales, para su uso comercial en la obtención de productos químicos de alto valor agregado. *Saccharomyces cerevisiae* es un ejemplo del éxito de las levadu-

ras en la biotecnología y su producción a escala industrial. No obstante, existen otros tipos de levaduras no-convencionales, como aquellas del género *Pichia*, las cuales destacan por sus aplicaciones en la industria vinícola (Vicente et al. 2021), obtención de proteínas recombinantes (Karbalaeei et al. 2020), producción de edulcorantes no calóricos (Mudliar et al. 2022) y productos naturales (Rentería-Martínez et al. 2021).

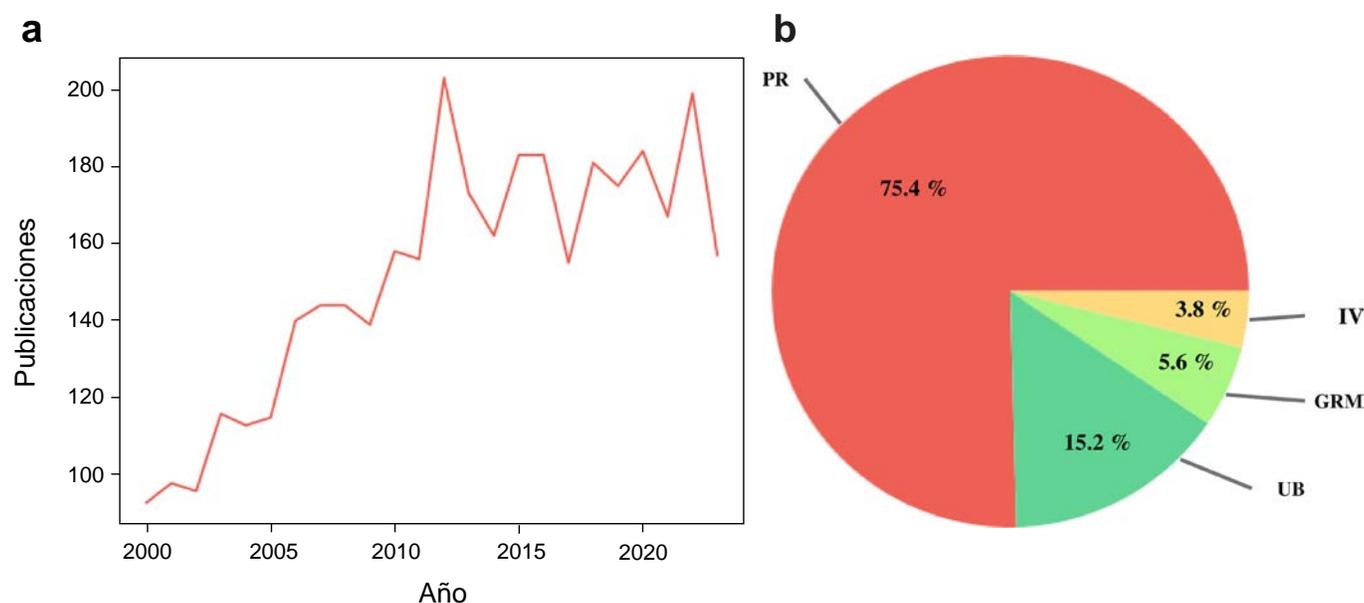
Los productos naturales y sus derivados, representan el 32% de todos los medicamentos de molécula pequeña que aprobó la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) desde enero de 1981 hasta septiembre de 2019 (Newman y Cragg 2020) y la mayoría provienen de especies microbianas tanto eucariotas como procariotas (Smanski et al. 2016). Por esa razón, el uso de levaduras del género *Pichia* es un área de oportunidad. Además, la síntesis microbiana tiene beneficios como la reducción del consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>; técnicas de purificación sencillas en comparación con aquellas que generan residuos en forma de catalizadores o disolventes metálicos; fuentes de energía renovables y la preferencia general de las enzimas a realizar síntesis quirales.

Esta revisión, se orienta al uso de especies de

*Pichia* por sus capacidades biotecnológicas, tolerancia para crecer en condiciones hiperosmóticas, así como para la obtención de bioproductos y polioles. Se analizan fuentes de carbono baratas y sostenibles, como el glicerol, y se recopila información valiosa que aborda los desafíos futuros relacionados con el uso de estas levaduras. En los últimos años, su aplicación para el desarrollo biotecnológico atrajo la atención de la comunidad científica, que se refleja en el número creciente de publicaciones (**Figura 1a**), dentro de las cuales, se destacan áreas de investigación referentes a la síntesis de proteínas recombinantes, usos biotecnológicos, estudios genómicos y sobre rutas metabólicas, entre otros (**Figura 1b**).

### El género *Pichia*

El género *Pichia* pertenece a la familia *Saccharomycetaceae*, sus células son esféricas, elipsoidales o alargadas y ocasionalmente tienen presencia de pseudohifas. Su reproducción asexual, es por gemación multilateral y la sexual por ascos no conjugados que, en caso de estarlo, la conjugación ocurre entre una célula madre y su yema o entre células independientes. Los ascos son típicamente delicuescentes y ocasionalmente persistentes, estos



**Figura 1.** Indicadores sobre trabajos presentados en relación al género *Pichia*. **a)** Número de publicaciones en áreas de biotecnología y, **b)** Publicaciones por área de aplicación, donde **GRM:** Genoma y rutas metabólicas, **IV:** Industria vinícola, **PR:** Proteínas recombinantes, **UB:** Usos biotecnológicos (Fuente: ScienceDirect©).

producen de una a cuatro ascosporas, las cuales tienen una morfología variada, sombrero, hemisferoidal o esferoidal con saliente (Kurtzman 1998). Sin embargo, los cambios morfológicos se consideran genéricos, dado que, algunos rasgos se utilizan de manera inconsistente y se consideran caracteres comunes en algunos taxones y atributos específicos de otros (Price et al. 1978). Un ejemplo de ello fue la reasignación de las especies de *Hansenula* a *Pichia*.

El género *Hansenula* se caracterizó por los mismos rasgos fenotípicos, con la excepción de que las especies de *Hansenula* asimilan el nitrato como única fuente de nitrógeno, mientras que las especies de *Pichia* no cuentan con esta propiedad (Nakase y Komagata 1969; Irzykowska y Waśkiewicz 2014). Este descubrimiento, en conjunto con experimentos de reasociación del ADN nuclear, separa a los géneros *Pichia* y *Hansenula*. Con este hallazgo, la definición de *Pichia* se amplió y se incluyeron 91 especies en el género (Kurtzman 1984), aproximadamente el 20% de las levaduras ascomicetas conocidas. El análisis filogenético compara las relaciones entre especies de *Pichia* y tienen un efecto en los cambios taxonómicos (Nakase y Komagata 1970), habiéndose descrito especies nuevas y reclasificándose otras (Kurtzman et al., 2011). Z. Liu y Kurtzman, (1991) demostraron a partir del análisis de secuencias parciales codificantes de ARNr, que las especies con esporas de Saturno asignadas a *Pichia* representan un clado aislado para el cual propusieron el género *Saturnispora*. Otros estudios propusieron los géneros *Ogataea*, para las levaduras que asimilan metanol en el clado *Pichia angusta* (*Hansenula polymorpha*) (Yamada et al. 1995a) y el género *Komagataella* para *Pichia pastoris*, una levadura relacionada con el clado *Ogataea* que no asimila metanol (Yamada et al. 1994). Otros géneros nuevos derivados de *Pichia* a partir de análisis de secuencias de ADN incluyeron *Kuraishia* para *Pichia capsulata*, *Nakazawaea* para *Pichia holstii* (Yamada et al., 1994) y *Kodamaea* para *Pichia ohmeri* (Yamada et al. 1995b). *Kregervanrija* alberga a *Pichia fluxuum* y especies relacionadas (Kurtzman 2006). Con estos cambios, después de la circunscripción filogenética, el número de especies se redujo a 20 (Kurtzman

2011). Actualmente, las especies *P. anómala*, *P. fermentans*, *P. kluyveri* y *P. kudriavzevii* se utilizan en la biotecnología y biología molecular. Estas levaduras están ampliamente distribuidas y tienen una amplia gama de aplicaciones (Shrivastava et al. 2023).

### La aplicación de *Pichia* en la obtención de bioproductos

Las industrias de alimentos y bebidas utilizan ésteres de ácidos grasos de cadena corta como saborizantes y fragancias. El acetato de isoamilo (IAA) se caracteriza por su olor a plátano y es de importancia en las industrias del perfume, farmacéutica y alimentaria (Torres et al. 2009). La obtención de este tipo de moléculas a través del proceso de tecnología blanca está en auge. La levadura *P. fermentans* ITD-00165, se aisló de la fermentación alcohólica espontánea de *Agave duranguensis* (Páez-Lerma et al. 2013) y se investigó por su capacidad de producir IAA (Hernández-Carbajal et al. 2013). Otro estudio demostró que la aireación controlada tiene un efecto significativo en la producción de IAA con *P. fermentans* ITD-00165 y alcohol isoamílico como precursor (Rentería-Martínez et al. 2021). El IAA aumentó aproximadamente 2.5 veces, con respecto al valor que informaron los mismos autores en publicaciones anteriores (Rentería-Martínez et al. 2016). La producción de IAA fue de 2.138 g L<sup>-1</sup>, cuando el biorreactor operó a 0.71 vvm y 168 rpm ( $k_L a = 0.16 \text{ h}^{-1}$ ), disminuyendo al aumentar las condiciones de aireación. Esto demostró que la aireación excesiva afecta negativamente la producción del aroma. Por otro lado, los desafíos que se relacionan con la producción de IAA incluyen dificultades como la separación de fases y purificación del producto (Osorio-Viana et al. 2014), en los que la ingeniería de procesos es necesaria para la resolución de estos retos.

El uso de pervaporadores, como único método de separación después de la fermentación, concentró el IAA de 9 a 61.8 mg L<sup>-1</sup> en la primera hora de pervaporación, proceso realizado a 45 °C por 13 h a un flujo de alimentación de 1.5 mL min<sup>-1</sup> y 0.1 kPa (Rossi et al. 2017). Sánchez-Castañeda et al., (2018) exploraron el uso de un modelo matemático

para la optimización de un sistema de fermentación con aireación constante que se acopló a una extracción líquido-líquido *in situ* para la producción de IAA mediante la fermentación de melaza de caña de azúcar con la cepa *P. fermentans* ITD00165 y *L*-leucina como precursor. El modelo integró la producción biológica del IAA, el coeficiente de partición en el sistema de dos fases líquidas y el efecto de extracción de la aireación. Los autores reportaron una productividad de 26 mg L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> con la adición de 4 g L<sup>-1</sup> de *L*-leucina a las 12 h de fermentación. El modelo, para la optimización del proceso, calculó que la máxima productividad teórica que se puede obtener es de 63 mg L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> y la mínima cantidad de *L*-leucina que se puede agregar sin reducir la producción de IAA es de 1.6 g L<sup>-1</sup>. Los estudios referentes a la producción de IAA a partir de *P. fermentans* son extensos y demuestran que la obtención de bioproductos requiere de la ingeniería de procesos para el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones industriales.

### Especies de *Pichia* osmotolerantes

El género *Pichia* incluye especies xerófilas, halófilas y osmófilas, las cuales pueden sobrevivir bajo altas presiones osmóticas generadas por la elevada concentración de solutos orgánicos (Siavoshi *et al.*, 2020). En condiciones hiperosmóticas las levaduras osmófilas aumentan la concentración de soluto intracelular, bombeando iones inorgánicos que se encuentran en el ambiente externo o sintetizando solutos compatibles. Especies tolerantes al azúcar/polioles, como *Pichia farinosa*, también son altamente tolerantes a las sales y viceversa (Bubnová *et al.* 2014). Las levaduras aisladas de medios marinos y/o salinos viven en ambientes de alta salinidad, por lo tanto, se espera que estas tengan tolerancia a las sales. El efecto de la osmolaridad sobre la fisiología celular ha sido objeto de investigación en muchas especies (**Tabla 1**).

La alta osmolaridad es importante para los procesos de producción biotecnológicos que aspira a la obtención de altas densidades celulares y productos específicos. En general, las levaduras acumulan y utilizan polioles, trehalosa, prolina, arginina o GABA como osmolitos compatibles, que

contribuyen a la osmoadaptación (Saito y Posas 2012), y las especies de *Pichia* producen arabitol como principal osmolito en respuesta al estrés osmótico (Dragosits *et al.* 2010).

### Producción de polioles

Los polioles o alcoholes de azúcar son compuestos de interés económico e industrial, los cuales se emplean como materias primas en la producción de compuestos enantiopuros, glicolípidos inmunosupresores y herbicidas (Urbansky *et al.* 2004); polímeros como espuma de poliuretano (Kirpluks *et al.* 2020) y disolventes eutécticos (Nagendramma *et al.* 2023). En la administración y formulación de medicamentos tienen aplicaciones como cosurfactantes en microemulsiones (Ahmed *et al.* 2020) y excipientes (Dash *et al.* 2019). Además, estos compuestos se emplean como sustitutos del azúcar por ser edulcorantes bajos en calorías (Erian y Sauer 2022).

El mercado mundial de alcoholes de azúcar se ha incrementado por sus diversas aplicaciones. En el 2019, el comercio de estos compuestos, generó ingresos económicos por 26.2 millones de dólares y se prevé que para el 2024 estas cifras alcancen hasta los 34.4 millones de dólares (Sardon *et al.* 2021). Estos números muestran que la producción de

**Tabla 1.** Levaduras del género *Pichia* aisladas de medios con una alta salinidad.

Levaduras	Medio del que se aisló	Referencia
<i>Pichia terricolai</i>	Zonas intermareales	(Soares <i>et al.</i> 1997)
<i>P. membranaefaciens</i>		
<i>P. guilliermondii</i>	Salmuera	(Choi y Park 1999)
<i>P. anomala</i>	Medios marinos	(Wang <i>et al.</i> 2007)
<i>P. capsulata</i>	Sedimentos de la costa sureste de la India	(Kathiresan <i>et al.</i> 2011)
<i>P. fermentans</i>		
<i>P. salicaria</i>		
<i>P. occidentalis</i>	Lodo marino	(Song <i>et al.</i> 2017)
<i>P. manshurica</i>	Agua de mar	(Sundaramoorthy y Gummedi 2019)
<i>P. kluyveri</i>	Todo tipo de ecosistemas	(Vicente <i>et al.</i> 2021)

polioles es un proceso redituable. Sin embargo, el desarrollo de procesos económicamente sustentables requiere de conceptos como la economía circular, en los que se incluya la obtención de alcoholes de azúcar a partir de residuos orgánicos por conversión microbiana (Erian y Sauer 2022).

Los polioles se secretan de forma natural por bacterias ácido-lácticas, hongos de los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Trichoderma*, y levaduras como *Candida*, *Debaromyces*, *Pichia* y *Yarrowia*. Estos compuestos cumplen con funciones en el metabolismo microbiano por ser asimilables como fuentes de carbono (Barnett 1968), actúan como osmorreguladores (González-Hernández et al. 2005) y en la producción de enzimas (Duman-Özdamar y Binay 2021). Aunque todos los polioles que se producen por microorganismos tienen propiedades similares, diferentes levaduras producen distintos alcoholes de azúcar, inclusive mezclas de los mismos, el por qué las levaduras favorecen la formación de un poliol en lugar de otro no es del

todo preciso. A menudo, el alcohol de azúcar que se forma depende de la fuente de carbono, como es el caso de la conversión de arabinosa a arabitol o xilosa en xilitol, pero ocasionalmente la producción de los alcoholes de azúcar parece arbitraria, especialmente cuando se utiliza glucosa como fuente de carbono. **La Tabla 2** presenta la síntesis de alcoholes de azúcar como el arabitol, eritritol, galactitol y xilitol en levaduras del género *Pichia*

La **Figura 2** muestra las vías metabólicas que siguen las levaduras para la producción de polioles.

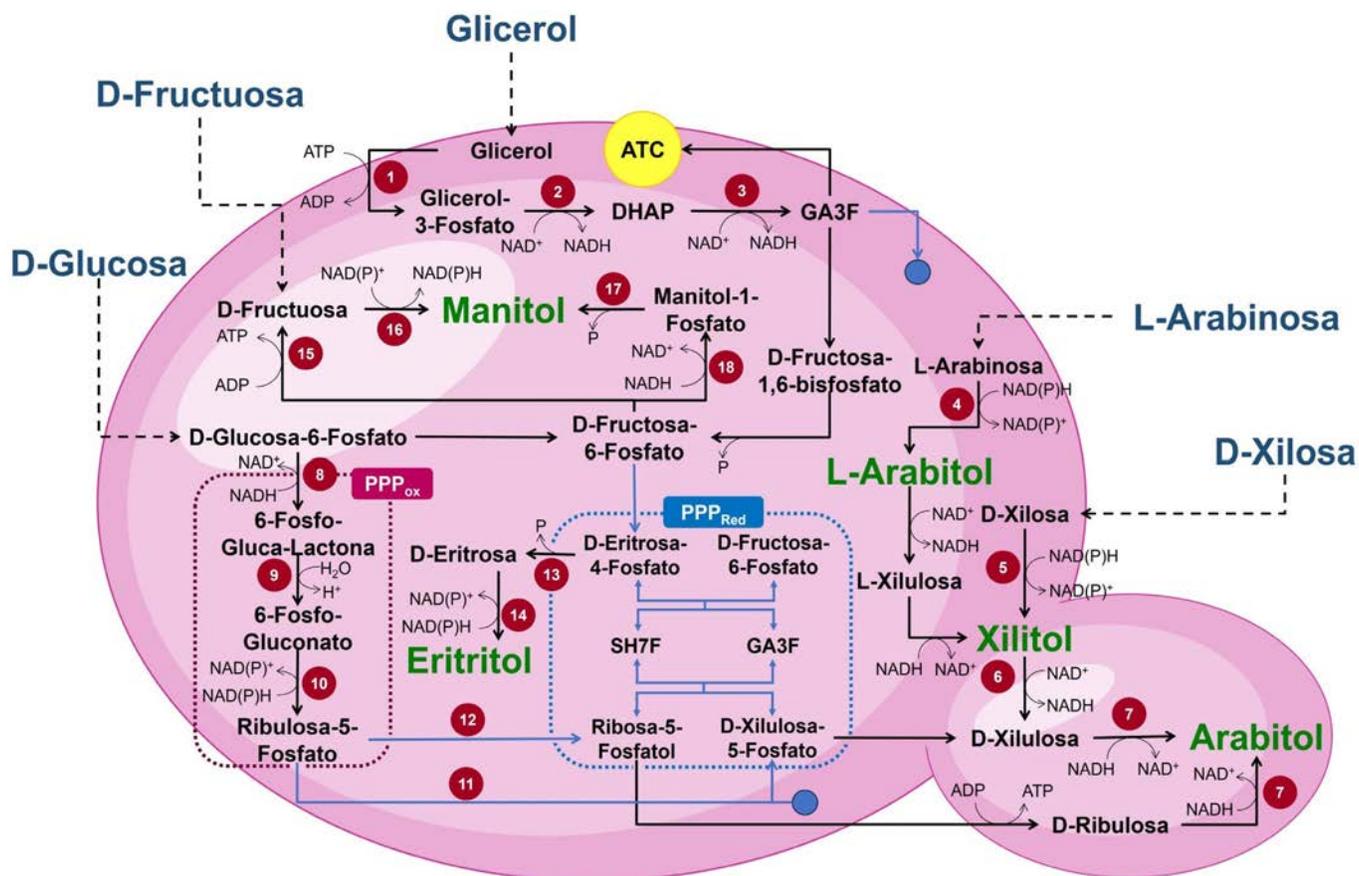
### Producción de arabitol a partir de levaduras del género *Pichia*

El arabitol es un poliol de cinco carbonos con un grupo hidroxilo en cada carbono perteneciente a la familia de los pentitol, es un estereoisómero de xilitol y su peso molecular es de 152 g mol<sup>-1</sup>. Este compuesto, se utiliza en la industria alimentaria y terapéutica, que se caracteriza por su dulzor similar a la sacarosa y contiene 0.2 kcal g<sup>-1</sup>, no genera

**Tabla 2.** Polioles que se producen en levaduras del género *Pichia*.

Poliol	Levadura	Fuente de carbono	C	R	Referencias
			(g L <sup>-1</sup> )	(g g <sup>-1</sup> )	
Arabitol	<i>Pichia stipitis</i>	L – arabinosa	-	0.57	McMillan y Boynton, 1994
	<i>P. farinosa</i>	Glucosa	42	-	Bisping et al., 1996
	<i>P. guilliermondii</i>	L – arabinosa	-	0.47	Fonseca et al., 2007
	<i>P. ohmerii</i>	Glucosa	-	0.41	Zhu et al., 2010
	<i>P. anomala</i>	Glucosa/Xilosa	-	0.77	G. Zhang et al., 2014
	<i>P. manchurica</i>	Glucosa	35.7	0.24	Sundaramoorthy y Gummadi, 2019
	<i>P. pastoris</i>	Glucosa	7.02	-	Moreira-Melo et al., 2020
Eritritol	<i>P. miso</i>	Glucosa	-	-	Onishi, 1960
	<i>Pichia sp.</i>	Glucosa	40	-	Kim et al., 1999
	<i>P. pastoris (mut)</i>	Metanol	10.6	-	S. J. Zhao et al., 2023
Xilitol	<i>P. pinus</i>	D-xilosa	10.9	-	Suryadi et al., 2000
	<i>P. guilliermondii</i>	D-xilosa	-	0.58	Zou et al., 2010
	<i>P. caribbica</i>	D-xilosa	-	0.85	Mukherji et al., 2013
	<i>P. kudriavzevii</i>	HMM	13.7	-	Jolayemi et al., 2022
	<i>P. stipitis</i>	D-xilosa	52	0.74	Goli et al., 2023

**C:** Concentración, **HMM:** hidrolizados de mazorca de maíz, **R:** Rendimiento.



**Figura 2.** Rutas metabólicas para la producción de polioles en levaduras a partir de diferentes fuentes de carbono. Las fuentes de carbono se representan con letras de color azul y los polioles formados se muestran en letras de color verde. Líneas punteadas indican la absorción de la molécula y continuas refieren a reacciones enzimáticas. Los círculos guindas con número en el interior representan las enzimas involucradas en las reacciones, donde 1: Glicerol quinasa, 2: Glicerol-3-fosfato deshidrogenasa, 3: DHAP deshidrogenasa, 4: L-arabinosa reductasa, 5: D-xilosa reductasa, 6: Xilitol deshidrogenasa, 7: D-arabitol deshidrogenasa, 8: Glucosa-6-fosfato deshidrogenasa, 9: 6-fosfoglucolactona, 10: 6-fosfoglucolactona deshidrogenasa, 11: Ribulosa-5-fosfato epimerasa, 12: Ribulosa-5-fosfato isomerasa, 13: D-eritrosa-4-fosfato fosfatasa, 14: D-eritrosa reductasa, 15: Hexoquinasa, 16: Manitol deshidrogenasa, 17: Manitol-1-fosfatasa, 18: Manitol-1-fosfato-deshidrogenasa. ATC: ácido tricarbóxico, DHA<sup>+</sup>: dihidroxiacetona, DHAP<sup>+</sup>: dihidroxiacetona fosfato, ATP: Adenosín trifosfato, P: fósforo, GA3F: Gliceraldehído-3-Fosfato, SH7P: Sedoheptulosa-7-Fosfato, H<sub>2</sub>O: agua, H<sup>+</sup>: Hidrógeno, PPP<sub>ox</sub>: vía de las pentosas fosfato oxidativas, PPP<sub>Red</sub>: vía de las pentosas fosfato reductivas (Tomado y modificado de Erian y Sauer, 2022).

caries dentales, reduce significativamente el tejido adiposo en el cuerpo y previene la deposición de grasa en el tracto digestivo. Su eficacia es similar a la de las fibras dietéticas solubles (Jiang et al. 2011; Kumdam et al. 2014) y es sustrato para producir ácidos arabinóico y xilónico, propileno, etilenglicol, xilitol, compuestos enantiopuros, glicolípidos inmunosupresores, herbicidas y medicamentos antipatógenos (Zhang et al. 2014b). El mercado mundial de edulcorantes de polioles alcanzó los 5,600 millones de dólares en 2019, mientras que se prevé que aumente a una tasa de crecimiento anual

del 6.4% para el período de pronóstico de 2020-2027. Además, el Departamento de Energía de EE.UU. incluyó al arabitol dentro de los doce químicos útiles para la biorrefinería y se designa como objetivo principal para futuras investigaciones y desarrollos dentro de la biotecnología industrial (Erickson et al. 2012).

El arabitol se produce en microorganismos en las dos isoformas *L*- y *D*-arabitol. Mientras que el *L*-arabitol se deriva de la *L*-arabinosa, se considera que el *D*-arabitol se origina a partir de intermediarios de la vía de las pentosas fosfato (PPP). Dependiendo

de la cepa, la *D*-xilulosa-5-fosfato o la *D*-ribulosa-5-fosfato se desfosforila a *D*-xilulosa o *D*-ribulosa, respectivamente. Estas dos cetopentosas se reducen a *D*-arabitol mediante la arabitol deshidrogenasa, formadora de *D*-xilulosa (Nozaki et al. 2003) o *D*-ribulosa (Murray et al. 1995). Al contrario de la manitol deshidrogenasa, la arabitol deshidrogenasa suele depender de NAD<sup>+</sup> en lugar de NADP<sup>+</sup>. Los géneros *Candida*, *Pichia*, *Debaryomyces* y *Zygosaccharomyces* producen arabitol bajo estrés osmótico, entre otros polioles, como glicerol, xilitol, eritritol y manitol, para equilibrar la presión osmótica a través de la membrana celular (van Eck' et al., 1990; (Kordowska-Wiater 2015). Entre las especies de *Pichia* eficaces para producir arabitol se encuentran *P. guilliermondii* y *Pichia stipitis* con *L*-arabinosa como fuente de carbono (Fonseca et al., 2007; McMillan y Boynton, 1994) *P. anomala* y *P. ohmeri* a partir de glucosa (Zhu et al. 2010) y *P. pastoris* crecida en glicerol (Moreira-Melo et al. 2020). Aún son escasos los estudios referentes a la producción de arabitol por fermentación de glicerol con levaduras del género *Pichia*, abriéndose la oportunidad para futuras investigaciones referentes al tema.

## Conclusiones y perspectivas

Las especies de *Pichia* destacan como organismos modelo para la biosíntesis de productos valiosos, poseen atributos deseables en la biotecnología y aplicaciones en la industria vinícola. Sin embargo, a pesar de la notable capacidad de estas levaduras para producir moléculas como el acetato de isoamilo y la producción de polioles, aún existen áreas de oportunidad en la generación de conocimiento, incrementar tanto los rendimientos de los productos como su calidad y reducir los costos de producción.

El género *Pichia* destaca por proporcionar sabores únicos a las bebidas fermentadas, otros atributos son la producción de bioetanol, metabolitos secundarios, polioles y enzimas industriales. Sus especies prosperan en condiciones ambientales extremas como alta salinidad, temperatura y pH ácido, destacando *P. anomala*, *P. fermentans*, *P. guilliermondii*, *P. kluyveri*, *P. kudriavzevii*, *P. pastoris* y *P. stipitis* por su potencial biotecnológico.

Otro factor tecnológico de interés es la producción de alcoholes de azúcar mediante fermentaciones microbianas, incluyendo diversos polioles como el arabitol y xilitol. Además, dado el cambio hacia una economía circular, el uso de sustratos renovables para la producción de alcohol de azúcar resulta especialmente atractivo. Sin embargo, las sustancias inhibitoras presentes en estos sustratos (o sus hidrolizados) disminuyen el rendimiento y afectan el desarrollo del proceso, por lo que se necesitan más estudios con la finalidad de reducir los efectos negativos durante el pretratamiento que conduzcan a una mejor adaptación de las células, e identificar nuevas cepas con potencial promisorio.

Como se ha mencionado, el arabitol es de interés en las industrias alimentaria y terapéutica, así, el Departamento de Energía de los Estados Unidos lo incluyó dentro de los doce químicos útiles para la biorrefinería. Antes del año 2000, el número de artículos científicos sobre la producción microbiana de arabitol eran escasos, su demanda creciente y valor en el mercado ha incentivado los estudios a este respecto. Hasta el año 2023, las investigaciones se habían centrado en la detección de microorganismos capaces de producir arabitol a partir de materiales de desecho como la hemicelulosa o el glicerol, particularmente *Debaryomyces* sp. y *Candida quercitrusa*, por lo que futuras investigaciones acerca de especies de *Pichia* capaces de producir arabitol a partir de glicerol son relevantes. En cuanto a los avances tecnológicos, la aplicación de la ingeniería metabólica, permitiría generar microorganismos capaces de maximizar la cantidad y calidad de los productos que se obtienen a partir de desechos, así como reducir los costos de producción. La mayoría de las cepas de levadura no convencionales producidas mediante esta estrategia se utilizan en una producción a gran escala, por lo que existe un interés creciente sobre el potencial de aislados provenientes de diferentes ambientes, los cuales tienen atributos como estabilidad genética, adaptación ambiental y características biotecnológicas que pueden usarse en diferentes aplicaciones.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química. Al Laboratorio de Biotecnología y Bioingeniería de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el apoyo en infraestructura para realizar este proyecto y al Laboratorio de Bioquímica del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia por la donación de reactivos y las facilidades brindadas para el acceso a sus instalaciones.

## Referencias

- Ahmed N, Kermanshahi B, Ghazani SM, Tait K, Tchong M, Roma A, Callender SP, Smith RW, Tam W, Wettig SD, Rogers MA, Marangoni AG, Spagnuolo PA (2020). Avocado-derived polyols for use as novel co-surfactants in low energy self-emulsifying microemulsions. *Scientific Reports* 10(1):1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62334-y>
- Barnett JA (1968). The catabolism of acyclic polyols by yeasts. *Journal of General Microbiology* 52(1):131-159. <https://doi.org/10.1099/00221287-52-1-131>
- Bisping B, Baumann U, Simmering R (1996). Effects of immobilization on polyol production by *Pichia farinosa*. *Progress in Biotechnology* 11(C):395-401. [https://doi.org/10.1016/S0921-0423\(96\)80054-2](https://doi.org/10.1016/S0921-0423(96)80054-2)
- Bubnová M, Jana Z, Hana S (2014). Osmotolerant yeast species differ in basic physiological parameters y in tolerance of non-osmotic stresses. *Yeast* 31(8):309-321. <https://doi.org/10.1002/yea>
- Choi MH, Park YH (1999). Growth of *Pichia guilliermondii* A9, an osmotolerant yeast, in waste brine generated from kimchi production. *Bioresource Technology* 70(3):231-236. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00049-8)
- Dash RP, Srinivas NR, Babu RJ (2019). Use of sorbitol as pharmaceutical excipient in the present day formulations—issues y challenges for drug absorption y bioavailability. *Drug Development y Industrial Pharmacy* 45(9):1421-1429. <https://doi.org/10.1080/03639045.2019.1640722>
- Dragosits M, Stadlmann J, Graf A, Gasser B, Maurer M, Sauer M, Kreil DP, Altmann F, Mattanovich D (2010). The response to unfolded protein is involved in osmotolerance of *Pichia pastoris*. *BMC Genomics* 11(1):1-16. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-207>
- Duman-Özdamar ZE, Binay B (2021). Production of industrial enzymes via *Pichia pastoris* as a cell factory in bioreactor: Current status y future aspects. *Protein Journal* 40(3):367-376. <https://doi.org/10.1007/s10930-021-09968-7>
- Erian AM, Sauer M (2022). Utilizing yeasts for the conversion of renewable feedstocks to sugar alcohols - a review. *Bioresource Technology* 346:126296. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126296>
- Erickson B, Nelson JE, Winters P (2012). Perspective on opportunities in industrial biotechnology in renewable chemicals. *Biotechnology Journal* 7(2):176-185. <https://doi.org/10.1002/biot.201100069>
- Fonseca C, Romão R, Rodrigues De Sousa H, Hahn-Hägerdal B, Spencer-Martins I (2007). L-Arabinose transport y catabolism in yeast. *FEBS Journal* 274(14):3589–3600. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2007.05892.x>
- Goli JK, Panda SH, Linga VR, Bee H (2020). Statistical optimization of fermentation parameters using Plackett-Burman for enhanced xylitol production by *Pichia stipitis* Ncim 3498. *Plant Archives* 20(2): 4447–4454.
- González-Hernández JC, Jiménez-Estrada M, Peña A (2005). Comparative analysis of trehalose production by *Debaryomyces hansenii* y *Saccharomyces cerevisiae* under saline stress. *Extremophiles* 9(1): 7–16. <https://doi.org/10.1007/s00792-004-0415-2>
- Hernández-Carbajal G, Rutiaga-Quiñones OM, Pérez-Silva A, Saucedo-Castañeda G, Medeiros A, Soccol CR, Soto-Cruz NÓ (2013). Screening of native yeast from *Agave duranguensis* fermentation for isoamyl acetate production. *Brazilian Archives of Biology y Technology* 56(3):357-363. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132013000300002>
- Irzykowska L, Waśkiewicz A (2014). *Hansenula*: Biology y Applications. *Encyclopedia of Food Microbiology* 2:121-124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00151-8>
- Jiang M, Wang B, Yang L, Lin S, Cheng H (2011). Microbiological purification of L-arabitol from xylitol mother liquor. *Journal of Microbiology y Biotechnology* 21(1):43-49. <https://doi.org/10.4014/jmb.1006.06012>
- Jolayemi O, Oke MA, Rocha-Meneses L, Omojasola PF (2022). Utilization of *Pachysolen tannophilus* y *Pichia kudriavzevii* for the production of xylitol on undetoxified corn cob hydrolysates. *Agronomy Research* 20(1):188–199. <https://doi.org/10.15159/AR.22.026>
- Karbalaee M, Rezaee SA, Farsiani H (2020). *Pichia pastoris*: A highly successful expression system for optimal synthesis of heterologous proteins. *Journal of Cellular Physiology* 235(9):5867–5881. <https://doi.org/10.1002/jcp.29583>

- Kathiresan K, Saravanakumar K, Senthilraja P (2011). Bioethanol production by marine yeasts isolated from coastal mangrove sediment. *International Multidisciplinary Research Journal* 1(1):19–24. <http://irjs.info/index.php/irjs/article/viewArticle/7329>
- Kim SY, Oh DK, Jung SR (1999). *Process for preparing erythritol using novel cell of pichia*. U.S. Patent No. 6,001,616. Washington, DC: U.S. Patent y Trademark Office.
- Kirpluks M, Vanags E, Abolins A, Michalowski S, Fridrihsone A, Cabulis U (2020). High functionality bio-polyols from tall oil y rigid polyurethane foams formulated solely using bio-polyols. *Materials* 13(8): 38–53. <https://doi.org/10.3390/MA13081985>
- Kordowska-Wiater M (2015). Production of arabitól by yeasts: Current status y future prospects. *Journal of Applied Microbiology* 119(2):303–314. <https://doi.org/10.1111/jam.12807>
- Kumdam H, Murthy SN, Gummadi SN (2014). Arabitól production by microbial fermentation - biosynthesis y future applications. *International Journal of Sciences y Applied Research* 1(1):1–12.
- Kurtzman CP (1984). Synonymy of the yeast genera *Hansenula* y *Pichia* demonstrated through comparisons of deoxyribonucleic acid relatedness. *Antonie van Leeuwenhoek* 50(3):209–217. <https://doi.org/10.1007/BF02342132>
- Kurtzman CP (2011). Phylogeny of the ascomycetous yeasts y the renaming of *Pichia anomala* to *Wickerhamomyces anomalus*. *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General y Molecular Microbiology* 99(1):13–23. <https://doi.org/10.1007/s10482-010-9505-6>
- Kurtzman CP, Fell JW, Boekhout T (2011). *The Yeast: A Taxonomic Study* (1st ed.). Elsevier.
- Kurtzman CP (1998). *Pichia* E.C. Hansen emend. Kurtzman. In: Kurtzman CP, Fell JW (Eds), *The Yeasts, A Taxonomic Study*. Elsevier, Amsterdam, pp. 273–352.
- Kurtzman CP (2006). New species y new combinations in the yeast genera *Kregervanrija* gen. nov., *Saturnispora* y *Candida*. *FEMS Yeast Research* 6(2):288–297. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2005.00019.x>
- Liu Z, Kurtzman CP (1991). Phylogenetic relationships among species of *Williopsis* y *Saturnospora* gen. nov. as determined from partial rRNA sequences. *Antonie van Leeuwenhoek* 60:21–30.
- McMillan JD, Boynton BL (1994). Arabinose utilization by xylose-fermenting yeasts y fungi. *Applied Biochemistry y Biotechnology* 45-46(1):569–584. <https://doi.org/10.1007/BF02941831>
- Moreira-Melo NT, Pontes-Coimbra G, Pierotti-Procópio D, Cunha GC de G, Pontes-Eliodório K, Costa-Paes H, Olitta-Basso T, Skorupa-Parachin N (2020). Evaluation of product distribution in chemostat y batch fermentation in lactic acid-producing *Komagataella phaffii* strains utilizing glycerol as substrate. *Microorganisms* 8(5):1–12. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050781>
- Mudliar BB, Bokade SN, Debnath VV (2022). Effect of furfural, acetic acid y 5-hydroxymethylfurfural on yeast growth y xylitol fermentation using *Pichia stipitis* NCIM 3497. *Biomass Conversion y Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02758-w>
- Mukherji R, Joshi-Navare K, Prabhune A (2013) Crystalline Xylitol Production by a Novel Yeast, *Pichia caribbica* (HQ222812), y Its Application for Quorum Sensing Inhibition in Gram-Negative Marker Strain *Chromobacterium violaceum* CV026. *Applied Biochemistry y Biotechnology* 169(6):1753–1763. [doi:10.1007/s12010-012-0039-4](https://doi.org/10.1007/s12010-012-0039-4)
- Murray JS, Wong ML, Miyada CG, Switchenko AC, Goodman TC, Wong B (1995). Isolation, characterization y expression of the gene that encodes d-arabinitol dehydrogenase in *Candida tropicalis*. *Gene* 155(1):123–128. [https://doi.org/10.1016/0378-1119\(94\)00900-D](https://doi.org/10.1016/0378-1119(94)00900-D)
- Nagendramma P, Khatri PK, Goyal S, Jain SL (2023). Novel polyol-based deep eutectic solvent: a potential candidate for bio-lubricant y additive for tribological performance. *Biomass Conversion y Biorefinery* 13(7):5701–5708. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01611-w>
- Nakase T, Komagata K (1969). DNA base composition of the genus *Hansenula*. *Journal of General y Applied Microbiology* 15(1):85-95.
- Nakase T, Komagata K (1970). Significance of DNA base composition in the classification of yeast genus *Pichia*. *The Journal of General y Applied Microbiology* 16(6):511-521.
- Nandy SK, Srivastava RK (2018). A review on sustainable yeast biotechnological processes y applications. *Microbiological Research* 207:83-90. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.11.013>
- Newman DJ, Cragg GM (2020). Natural products as sources of new drugs over the nearly four decades from 01/1981 to 09/2019. *Journal of Natural Products* 83(3):770-803. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b01285>
- Nozaki H, Suzuki SI, Tsuyoshi N, Yokozeki K (2003). Production of *D*-arabitól by *Metschnikowia reukaufii* AJ14787.

*Bioscience, Biotechnology y Biochemistry* 67(9):1923-1929. <https://doi.org/10.1271/bbb.67.1923>

Onishi H (1960). Studies on osmophilic yeasts part VIII. Polyalcohol production by various genera y species of yeasts. *Bulletin of the Agricultural Chemical Society of Japan* 24(2):131-140.

Osorio-Viana W, Ibarra-Taquez HN, Dobrosz-Gómez I, Gómez-García MÁ (2014). Hybrid membrane y conventional processes comparison for isoamyl acetate production. *Chemical Engineering y Processing: Process Intensification* 76:70-82. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.12.005>

Páez-Lerma JB, Arias-García A, Rutiaga-Quiñones OM, Barrio E, Soto-Cruz NO (2013). Yeasts isolated from the alcoholic fermentation of *Agave duranguensis* during mezcal production. *Food Biotechnology* 27(4):342-356. <https://doi.org/10.1080/08905436.2013.840788>

Price CW, Fuson GB, Phaff HJ (1978). Genome comparison in yeast systematics: Delimitation of species within the genera *Schwanniomyces*, *Saccharomyces*, *Debaryomyces*, y *Pichia*. *Microbiological Reviews* 42(1):161-193. <https://doi.org/10.1128/mmbr.42.1.161-193.1978>

Rangel AET, Gómez Ramírez JM, González Barrios AF (2020). From industrial by-products to value-added compounds: the design of efficient microbial cell factories by coupling systems metabolic engineering y bioprocesses. *Biofuels, Bioproducts y Biorefining* 14(6):1228-1238. <https://doi.org/10.1002/bbb.2127>

Rentería-Martínez O, Páez-Lerma JB, Rojas-Contreras JA, López-Miranda J, Martell-Nevárez MA, Soto-Cruz NO (2021). Enhancing isoamyl acetate biosynthesis by *Pichia fermentans*. *Revista Mexicana de Ingeniera Química* 20(2):621-633. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio2125>

Rentería-Martínez O, Sánchez-Castañeda AK, Hernández-Carbajal G, Rutiaga-Quiñones OM, Rojas-Contreras JA, López-Miranda J, Paéz-Lerma JB, Soto-Cruz NO (2016). Isoamyl acetate production by *Pichia fermentans* isolated from alcoholic fermentation of Agave juice. In Rodríguez-Garay B, Kirchmayr MR, Herrera S, Urias J, Dávila-Vázquez G y Vázquez A (Eds.), *Sustainable y Integrated Use of Agave*. pp 85-88.

Rossi SC, Medeiros ABP, Weschenfelder TA, de Paula Scheer A, Soccol CR (2017). Use of pervaporation process for the recovery of aroma compounds produced by P. fermentans in sugarcane molasses. *Bioprocess y Biosystems Engineering* 40(6):959-967. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1759-1>

Saito H, Posas F (2012). Response to hyperosmotic stress. *Genetics* 192(2):289-318. <https://doi.org/10.1534/genetics.112.140863>

<https://doi.org/10.1534/genetics.112.140863>

Sánchez-Castañeda AK, Athès V, Moussa M, López-Miranda J, Páez-Lerma JB, Soto-Cruz NÓ, Trelea IC (2018). Modeling of isoamyl acetate production by fermentation with *Pichia fermentans* in an aerated system coupled to in situ extraction. *Process Biochemistry* 65:11-20. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.10.010>

Sardon H, Mecerreyes D, Basterretxea A, Avérous L, Jehanno C (2021). From lab to market: Current strategies for the production of biobased polyols. *ACS Sustainable Chemistry y Engineering* 9(32):10664-10677. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02361>

Shrivastava A, Pal M, Sharma RK (2023) *Pichia* as yeast cell factory for production of industrially important bio-products: Current trends, challenges, y future prospects. *Journal of Bioresources y Bioproducts* 8 (2):108-124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.01.007>

Smanski MJ, Zhou H, Claesen J, Shen B, Fischbach MA, Voigt CA (2016). Synthetic biology to access y expand nature's chemical diversity. *Nature Reviews Microbiology* 14(3):135-149. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2015.24>

Soares CAG, Maury M, Pagnocca FC, Araujo FV, Mendonça-Hagler LC, Hagler AN (1997). Ascomycetous yeasts from tropical intertidal dark mud of southeast Brazilian estuaries. *Journal of General y Applied Microbiology* 43(5):265-272. <https://doi.org/10.2323/jgam.43.265>

Song L, Shao Y, Ning S, Tan L (2017). Performance of a newly isolated salt-tolerant yeast strain *Pichia occidentalis* G1 for degrading y detoxifying azo dyes. *Bioresource Technology* 233:21-29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.065>

Sundaramoorthy BA, Gummadi SN (2019). Screening of new yeast *Pichia manchurica* for arabitol production. *Journal of Basic Microbiology* 59(3):256-266. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800366>

Suryadi H, Katsuragi T, Yoshida N, Suzuki S, Tani Y (2000). Polyol production by culture of methanol-utilizing yeast. *Journal of Bioscience y Bioengineering* 89(3):236-240. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(00\)88825-8](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(00)88825-8)

Torres S, Baigorí MD, Swathy SL, Pandey A, Castro GR (2009). Enzymatic synthesis of banana flavour (isoamyl acetate) by *Bacillus licheniformis* S-86 esterase. *Food Research International* 42(4):454-460. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.12.005>

Urbansky M, Davis CE, Surjan JD, Coates RM (2004). Synthesis of enantiopure 2-C-methyl-D-erythritol 4-phosphate y 2,4-cyclodiphosphate from D-arabitol. *Organic Letters*

6(1):135–138.

van Eck JH, Prior BA, Brandt EV (1990). Accumulation of polyhydroxy alcohols by the yeast *Hansenula anomala* in response to water stress. *Food Biotechnology* 4(1): 107.

Vicente J, Calderón F, Santos A, Marquina D, Benito S (2021). High potential of *Pichia kluyveri* y other *Pichia* species in wine technology. *International Journal of Molecular Sciences* 22(3):1–15. <https://doi.org/10.3390/ijms22031196>

Wang X, Chi Z, Yue L, Li J, Li M, Wu L (2007). A marine killer yeast against the pathogenic yeast strain in crab (*Portunus trituberculatus*) y an optimization of the toxin production. *Microbiological Research* 162(1):77–85. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.09.002>

Yamada Y, Maeda K, Mikata K (1994). The phylogenetic relationships of the hat-shaped ascospore-forming, nitrate-assimilating *Pichia* species, formerly classified in the Genus *Hansenula*, based on the partial sequences of 18S y 26S Ribosomal RNAs (Saccharomycetaceae). *Bioscience, Biotechnology, y Biochemistry* 58(7):1245–1257. <https://doi.org/10.1271/bbb.58.1245>

Yamada Y, Matsuda M, Maeda K, Mikata K (1995). The phylogenetic relationships of methanol-assimilating yeasts based on the partial sequences of 18S y 26S Ribosomal RNAs: The proposal of *Komagataella* Gen. Nov. (Saccharomycetaceae). *Bioscience, Biotechnology y Biochemistry* 59(3):439–444. <https://doi.org/10.1271/bbb.59.439>

bbb.59.439

Yamada Y, Suzuki T, Matsuda M, Mikata K (1995). The Phylogeny of *Yamadazyma ohmeri* (ETCHELLS et BELL) BILLON-GRAND based on the partial sequences of 18S y 26S Ribosomal RNAs: The Proposal of *Kodamaea* Gen. Nov. (Saccharomycetaceae). *Bioscience, Biotechnology y Biochemistry* 59(6):1172-1174. <http://dx.doi.org/10.1271/bbb.59.1172>

Zhang G, Lin Y, He P, Li L, Wang Q, Ma Y (2014). Characterization of the sugar alcohol-producing yeast *Pichia anomala*. *Journal of Industrial Microbiology y Biotechnology* 41(1):41–48. <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1364-5>

Zhao SJ, Wang XL, Sun JL, Tian J, Zhang J (2023). Modification of *Pichia pastoris* for erythritol production by metabolic engineering. *Biotechnology Bulletin* 39(8):137–147. <https://biotech.aiijournal.com/EN/Y2023/V39/I8/137>

Zhu HY, Xu H, Dai XY, Zhang Y, Ying HJ, Ouyang PK (2010). Production of D-arabitol by a newly isolated *Kodamaea ohmeri*. *Bioprocess y Biosystems Engineering* 33(5):565-571. <https://doi.org/10.1007/s00449-009-0378-x>

Zou Y zhi, Qi K, Chen X, Miao X ling, Zhong JJ (2010). Favorable effect of very low initial  $K_L a$  value on xylitol production from xylose by a self-isolated strain of *Pichia guilliermondii*. *Journal of Bioscience y Bioengineering* 109(2):149-152. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.07.013>



# La inoculación con *Azospirillum baldaniorum* Sp245 promueve la acumulación de ácido ascórbico, y disminuye la expresión de la cinasa TOR y la división celular en la raíz de *Arabidopsis*

## Inoculation with *Azospirillum baldaniorum* Sp245 promotes ascorbic acid accumulation while decreasing the expression of TOR kinase and cell division in the *Arabidopsis* root

Alma Alejandra Hernández Esquivel<sup>1</sup>, Jorge Alejandro Torres Olmos<sup>1</sup>, Marisol Bernal Avilés<sup>1</sup>, Manuel Méndez Gómez<sup>2</sup>, Elda Castro Mercado<sup>1</sup>, Cesar Arturo Peña Uribe<sup>1</sup>, Homero Reyes de la Cruz<sup>1</sup>, Ernesto García Pineda<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Edif. B1 CP 58040, Morelia, Michoacán, México

<sup>2</sup> CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato. C.P. 36821, Irapuato, Gto. México

### Historial

Manuscrito recibido: 4 de junio de 2024

Manuscrito aceptado: 22 de agosto de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Ernesto García Pineda

e-mail: egpineda@umich.mx

ORCID: 0000-0002-4739-7741

### Resumen

El ácido ascórbico (AA) participa en procesos de elongación y división celular. En este trabajo se reporta el efecto de *Azospirillum baldaniorum* Sp245 sobre la acumulación de ácido ascórbico, la proteína cinasa Target of Rapamycin (TOR) y la división celular en *Arabidopsis thaliana*. La inoculación con Sp245 incrementó la acumulación de ácido ascórbico en el follaje, mientras que su adición inhibió el crecimiento de las plantas, la expresión de TOR, y la división celular en el meristemo de la raíz. El ácido ascórbico también incrementó la producción de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Asimismo, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> disminuyó la expresión de TOR y su actividad sobre su proteína blanco S6K. Se discute la relación entre AA, TOR y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en la bioestimulación de *Arabidopsis* por Sp245.

**Palabras clave:** Ácido ascórbico, target of rapamycin, peróxido de hidrógeno, bioestimulación, bacterias benéficas.

### Introducción

*Azospirillum baldaniorum* Sp245 es una bacteria de vida libre que tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico y promueve el crecimiento de varias especies vegetales como el maíz, arroz, trigo y pastos, aumentando su rendimiento en condiciones de campo (Carro *et al.*, 2018). Algunas de sus propiedades específicas incluyen la producción de fitohormonas, la solubilización de fosfato y la

### Abstract

Ascorbic acid (AA) plays a role in cell elongation and division processes. In this work, the effect of *Azospirillum baldaniorum* Sp245 on the accumulation of ascorbic acid, the protein kinase TOR (Target of Rapamycin), and cell division in *Arabidopsis thaliana* is reported. Inoculation with Sp245 increased AA accumulation in the foliage, while its addition inhibited plant growth, TOR expression, and cell division in the root meristem. AA also increased the production of hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Furthermore, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> decreased TOR expression and its activity on its target protein S6K. The relationship between AA, TOR, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for bio-stimulation of *Arabidopsis* by Sp245 is discussed.

**Keywords:** Ascorbic acid, target of rapamycin, hydrogen peroxide, biostimulation, beneficial bacteria.

resistencia al estrés abiótico, que contribuyen a su eficacia como promotora del crecimiento vegetal (Carro *et al.*, 2018).

El ácido ascórbico, también conocido como vitamina C, es fundamental como antioxidante, protegiendo a las plantas del estrés oxidativo (Foyer y Noctor, 2011; Smirnoff y Wheeler, 2000). Está implicado en la regulación del desarrollo de órganos como las raíces y los brotes mediante la modulación

de la actividad de enzimas antioxidantes y la regulación de la expresión génica (Li *et al.*, 2019). También controla el ciclo celular, especialmente durante la fase de transición G1/S (Veljovic-Jovanovic *et al.*, 2002), y actúa como molécula señalizadora en la comunicación entre la planta y los microorganismos del suelo (Gullner *et al.*, 2018). Por ejemplo, Kim *et al.* (2014) encontraron que la aplicación de ácido ascórbico promueve la colonización de las raíces de *Arabidopsis thaliana* por rizobacterias promotoras del crecimiento.

El ácido ascórbico y el peróxido de hidrógeno son componentes cruciales en el metabolismo antioxidante de las plantas y están estrechamente relacionados con diversos procesos fisiológicos y de señalización. El ácido ascórbico desempeña un papel fundamental en la neutralización y eliminación de especies reactivas de oxígeno (ERO), incluyendo el peróxido de hidrógeno, que pueden causar daño oxidativo a las células vegetales (Mittler *et al.*, 2004). El peróxido de hidrógeno también puede actuar como una molécula señalizadora en la regulación de diversos procesos fisiológicos, ya que, en bajas concentraciones, se activan las respuestas adaptativas al estrés abiótico y la defensa contra patógenos. Sin embargo, en concentraciones elevadas afecta varios procesos celulares debido a que genera estrés oxidativo (Apel y Hirt, 2004). La relación entre el ácido ascórbico y el peróxido de hidrógeno en las plantas es dinámica y altamente regulada, así, los niveles de ácido ascórbico pueden influir en la producción y el metabolismo del peróxido de hidrógeno (Foyer y Noctor, 2011).

La cinasa Target of Rapamycin (TOR) es un regulador central del crecimiento y la proliferación celular en las plantas, participa en la coordinación de respuestas fisiológicas y metabólicas frente a señales ambientales y nutricionales. TOR regula la actividad de diversos factores de transcripción y proteínas cinasas implicadas en la adaptación a cambios en el ambiente, e interacciona con el peróxido de hidrógeno en el control del metabolismo celular (Crespo *et al.*, 2005). Dicha relación aún está siendo investigada, pero se plantea que la señalización entre ambos converge en la modulación del crecimiento y la tolerancia al estrés. En este

trabajo se analizó el efecto del ácido ascórbico sobre la vía metabólica de TOR y su regulación por peróxido de hidrógeno en *Arabidopsis thaliana* en respuesta a la inoculación con *Azospirillum baldaniorum* Sp245.

## Materiales y métodos

### Material biológico

En este estudio se emplearon las siguientes líneas de *Arabidopsis thaliana*: Col-0, CYCB1;1::GUS (Colón-Carmona *et al.*, 1999), TOR/tor::GUS (Menand *et al.*, 2002), y *tor-es* (Xiong y Sheen, 2012). La línea reportera TOR/tor::GUS fue obsequiada amablemente por el Dr. Benoît Menand de la Universidad de Aix-Marsella, Marsella, Francia. Esta línea lleva una fusión traduccional entre la secuencia N-terminal de TOR y GUS. La CYCB1;1::GUS se utilizó para examinar la actividad mitótica (G2/M) en el meristemo de la raíz, ya que consiste en la fusión de un fragmento genómico que contiene una secuencia promotora putativa y una secuencia codificante correspondiente a los 116 aminoácidos N-terminales de la CycB1:1 de *Arabidopsis* (Colón-Carmona *et al.*, 1999). Se utilizó también la cepa Sp245 de *Azospirillum baldaniorum*, donada por la Dra. Gladys Alexandre, del Departamento de Bioquímica y Biología Celular y Molecular de la Universidad de Tennessee, Knoxville, Tennessee USA. Todos los reactivos químicos fueron adquiridos de la marca Sigma-Aldrich (St Louis, MO, USA).

### Preparación de inóculo de Sp245

Se partió de un volumen de 50 mL de medio mínimo LB (Luria-Bertani) (peptona, 10 g/L; extracto de levadura, 5 g/L; NaCl, 5 g/L; MgSO<sub>4</sub>, 0.186 g/L CaCl<sub>2</sub>, 0.2775 g/L; pH 7.0), al que se le adicionaron 150 µL de un pre-inóculo con una densidad óptica a 600 nm de 0.900. El cultivo se creció durante 16 horas. Un mL del cultivo bacteriano se centrifugó a 3,893 g durante 5 min a temperatura ambiente (Eppendorf 5415D), y se eliminó el sobrenadante, y la pastilla de bacterias se resuspendió en 1 mL de NaCl al 0.85%, se agitó en vortex y se centrifugó nuevamente a 3,893 g durante 5 min. Se eliminó

el sobrenadante, y las bacterias se resuspendieron en 1 mL de amortiguador  $\text{MgSO}_4$  a 0.01 M, para su utilización como inóculo.

### Tratamiento de *Arabidopsis* con Sp245

Las semillas de *Arabidopsis* se desinfectaron en una campana de flujo laminar (adicionando 700  $\mu\text{L}$  de etanol al 96%, agitación durante 5 minutos, se desechó el líquido, 700  $\mu\text{L}$  de cloro al 20%, agitación durante 5 minutos y 5 lavados con 700  $\mu\text{L}$  de agua destilada estéril). Se adicionaron 100  $\mu\text{L}$  de agua destilada estéril y se almacenaron a 4 °C por 48 horas.

Las semillas se germinaron en medio de Muras-hige y Skoog (MS) solidificado con agar y se incubaron en una cámara de crecimiento (2,000 Lux, 26 °C, y con un fotoperiodo de 16 h luz y 8 h de oscuridad), durante 3 días. Posteriormente, se aplicaron 10  $\mu\text{L}$  del cultivo bacteriano formando una línea de 4 cm a una distancia de 1 cm del fondo de la caja Petri. Las plántulas germinadas se trasplantaron a las cajas Petri con la bacteria. Las cajas se sellaron con parafilm y se incubaron en una cámara de crecimiento (2,000 Lux, 26 °C, y con un fotoperiodo de 16 h luz y 8 h de oscuridad), durante 6 días.

Para los tratamientos con ácido ascórbico y peróxido de hidrógeno, las plántulas se transfirieron a cajas de Petri ajustando el medio de crecimiento con dos concentraciones de ácido ascórbico, 1 y 2 mM (Li *et al.*, 2018), y dos concentraciones de peróxido de hidrógeno, 0.5 y 1 mM (Claeys *et al.*, 2014). Al final de cada experimento, se cuantificó la longitud de la raíz primaria, el número de raíces laterales, el peso de la raíz, peso del follaje, longitud del meristemo y densidad de raíces laterales.

### Cuantificación de ácido ascórbico

El tejido vegetal se trituró en 1 mL de agua destilada estéril, se centrifugó a 12,000 rpm durante 5 min y se empleó el sobrenadante para cuantificar el ácido ascórbico. La mezcla de ensayo consistió de: 100  $\mu\text{L}$  de muestra, 800  $\mu\text{L}$  de amortiguador de acetato 3 M y 100  $\mu\text{L}$  de una solución de 0.3 mg/mL de 2-6 diclorofenolindofenol (DCPIP). La mezcla se agitó durante 5 segundos y se analizó la absorbancia en un espectrofotómetro a 520 nm (Davies *et al.*, 1991).

### El incremento en la absorbancia es proporcional a la acumulación de ácido ascórbico.

### Análisis de proteínas reporteras

La actividad de la proteína reportera GUS, presente en las líneas transgénicas CYCB1;1::GUS y TOR::GUS se analizó de acuerdo al protocolo reportado por Malamy y Benfey, 1997. Las muestras se montaron en portaobjetos y cubreobjetos para analizarlas bajo microscopía de campo claro.

### Detección de $\text{H}_2\text{O}_2$ por tinción con 3,3'-diaminobencidina (DAB)

Las plántulas de 6-7 días de crecimiento se colocaron en una solución con DAB a una concentración de 1 mg/mL, pH 3.8. Las muestras se incubaron durante 2 h. El tejido se clarificó en etanol (96%) hirviendo durante 10 min. Las muestras se observaron en un microscopio óptico. El peróxido de hidrógeno se visualizó por la formación de un precipitado de color café rojizo en el tejido (Thordal-Christensen *et al.*, 1997). La acumulación de especies reactivas de oxígeno se analizó de acuerdo al procedimiento descrito por Zheng *et al.* (2019).

### Análisis de la función y actividad de TOR

El análisis de la función de TOR se realizó utilizando el inhibidor AZD8055 y la línea mutante *tor-es* inducible por estradiol. Para esto, plántulas de 3 días de germinación se trasplantaron a cajas de Petri conteniendo el inhibidor AZD8055 a una concentración de 1  $\mu\text{M}$ , y estradiol a una concentración de 0.07  $\mu\text{M}$  (Zhang *et al.*, 2016). Las plántulas se crecieron durante 6 días en una cámara de crecimiento y se midieron los parámetros de crecimiento. La actividad de TOR se analizó por la fosforilación de la proteína S6k, la cual es el blanco inmediato de TOR, de acuerdo al procedimiento descrito por Reyes-de la Cruz *et al.* (2004).

### Análisis estadístico

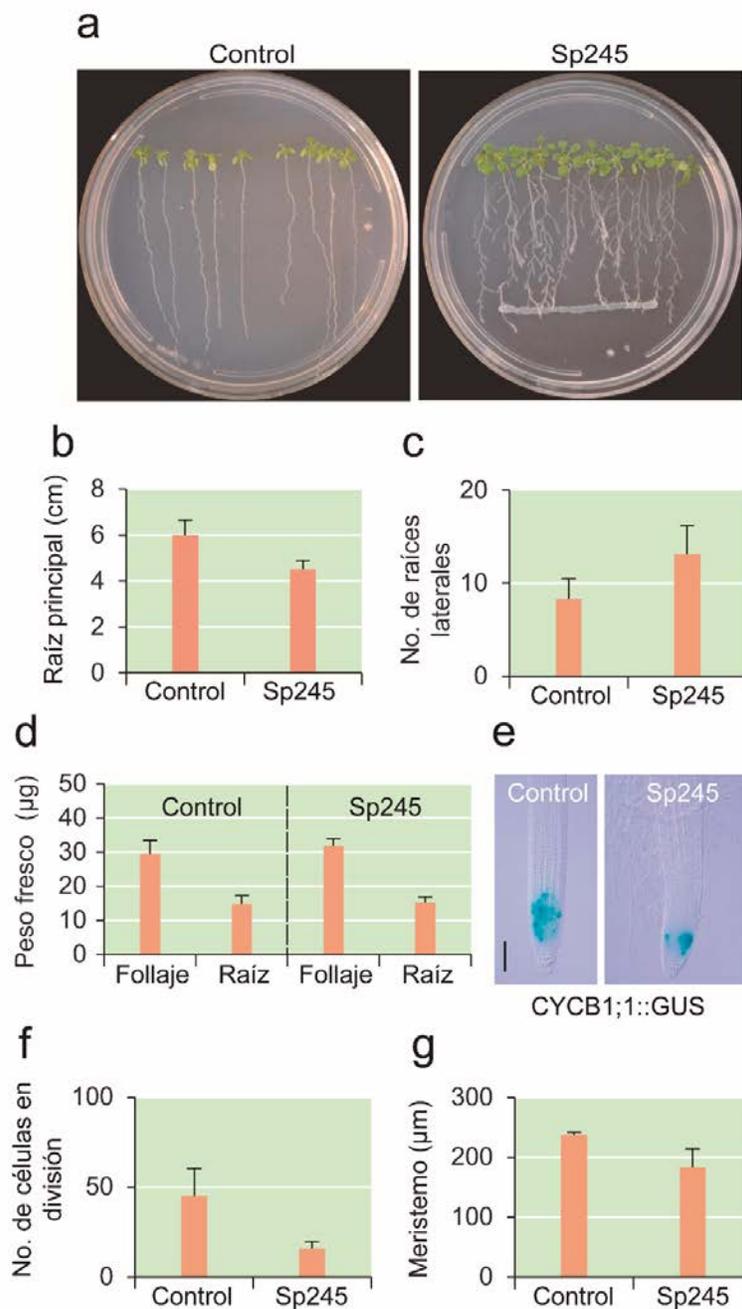
Los experimentos se repitieron tres veces, con tres replicas en cada experimento y 10 plantas por cada réplica. Los datos fueron procesados para obtener la media y la desviación estándar.

## Resultados

### Efecto de *Azospirillum baldaniorum* Sp245 sobre el crecimiento de *Arabidopsis thaliana*

Se analizó el efecto de Sp245 sobre las plántulas de *Arabidopsis* 6 días después de la inoculación. La morfología de las plántulas se modificó en respuesta

a la inoculación (**Fig. 1a**), la longitud de la raíz primaria disminuyó (**Fig. 1b**), y el número de raíces laterales se incrementó (**Fig. 1c**). Aunque en esta etapa no se observó un cambio importante sobre la biomasa en las plantas inoculadas, se apreció un incremento en el tamaño del follaje (**Fig. 1a, d**). Por otra parte, se redujo el número de células que



**Figura 1.** Efecto de *Azospirillum baldaniorum* Sp245 sobre *Arabidopsis thaliana*. Las plantas fueron inoculadas con Sp245, se crecieron durante 6 días y se analizaron los parámetros de crecimiento. **a)** Imagen de las plantas inoculadas y no inoculadas. **b,** **c)** Análisis de parámetros de la raíz. **d)** Peso fresco. **e)** Análisis del marcador de división celular CYCB1;1::GUS. **f)** Número de células en división. **g)** Longitud del meristemo de la raíz principal. Barra=100 µm. n=30.

expresaban CYCB1;1::GUS, lo cual correlacionó con la reducción en el tamaño del meristemo y el acortamiento de la raíz (**Fig. 1e-g**).

### **Efecto del ácido ascórbico sobre el crecimiento de *Arabidopsis***

El análisis de la acumulación de ácido ascórbico en las plántulas en respuesta a la inoculación con Sp245 indica un incremento en el follaje de las plántulas inoculadas, pero no se observaron cambios en la raíz, en relación con las plántulas no inoculadas (**Fig. 2a**). Estos resultados sugieren que Sp245 puede estimular la biosíntesis de ácido ascórbico específicamente en el follaje de *Arabidopsis*.

Para conocer la influencia del ácido ascórbico sobre el desarrollo vegetal, se aplicó 1 y 2 mM del compuesto al medio de cultivo, con lo que se observó una inhibición del crecimiento, siendo este más evidente en la concentración de 2 mM (**Fig. 2b**). El análisis del crecimiento de la raíz, formación de raíces laterales, biomasa radical y del follaje, indica un efecto represor para cada uno de estos parámetros, dependiente de la concentración utilizada, a mayor concentración de ácido ascórbico se notó un efecto inhibitorio mayor (**Fig. 2c-f**).

### **Efecto del ácido ascórbico sobre la expresión de TOR**

La cinasa TOR es un regulador clave para el crecimiento celular. A continuación, para conocer el efecto del AA sobre TOR, se analizó la expresión del reportero TOR::GUS en el meristemo de la raíz de plántulas crecidas durante 6 días en presencia de 1 mM de ácido ascórbico. Inicialmente, se analizó la expresión del reportero con la inoculación de la rizobacteria, y se observó una considerable disminución en su expresión (**Fig. 3a**). El tratamiento con ácido ascórbico disminuyó la expresión del reportero en una magnitud similar a la observada con la rizobacteria (aproximadamente 70%) (**Fig. 3b, c**).

Los resultados anteriores sugieren que la influencia de ácido ascórbico sobre TOR podría tener una función relevante en la modulación de la morfología de *Arabidopsis*. Para analizar esta posibilidad, se utilizó la línea *tor-es*, en la que se

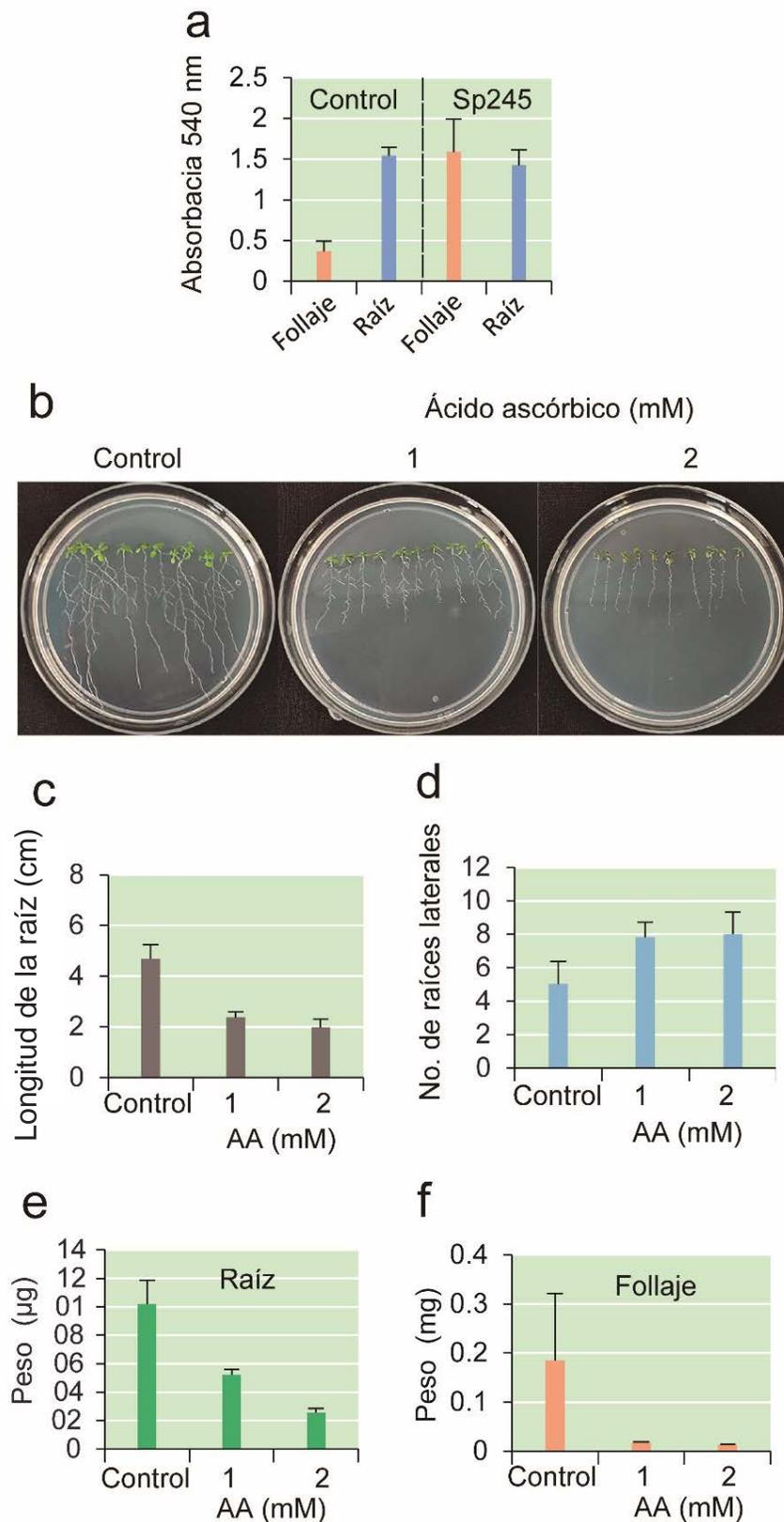
inhibe de la expresión de TOR con la aplicación de estradiol. Se inocularon plántulas de *Arabidopsis* con Sp245 en ausencia y en presencia de estradiol y se observó que el estradiol inhibe marcadamente el crecimiento y el desarrollo de las plántulas (**Fig. 3d**). La longitud de la raíz principal se inhibió aproximadamente 70 % y en número de raíces laterales en un 100 % (**Fig. 3e, f**), con lo que TOR podría estar modulando la respuesta de bioestimulación a Sp245.

### **Efecto del ácido ascórbico sobre la división celular en el meristemo de la raíz**

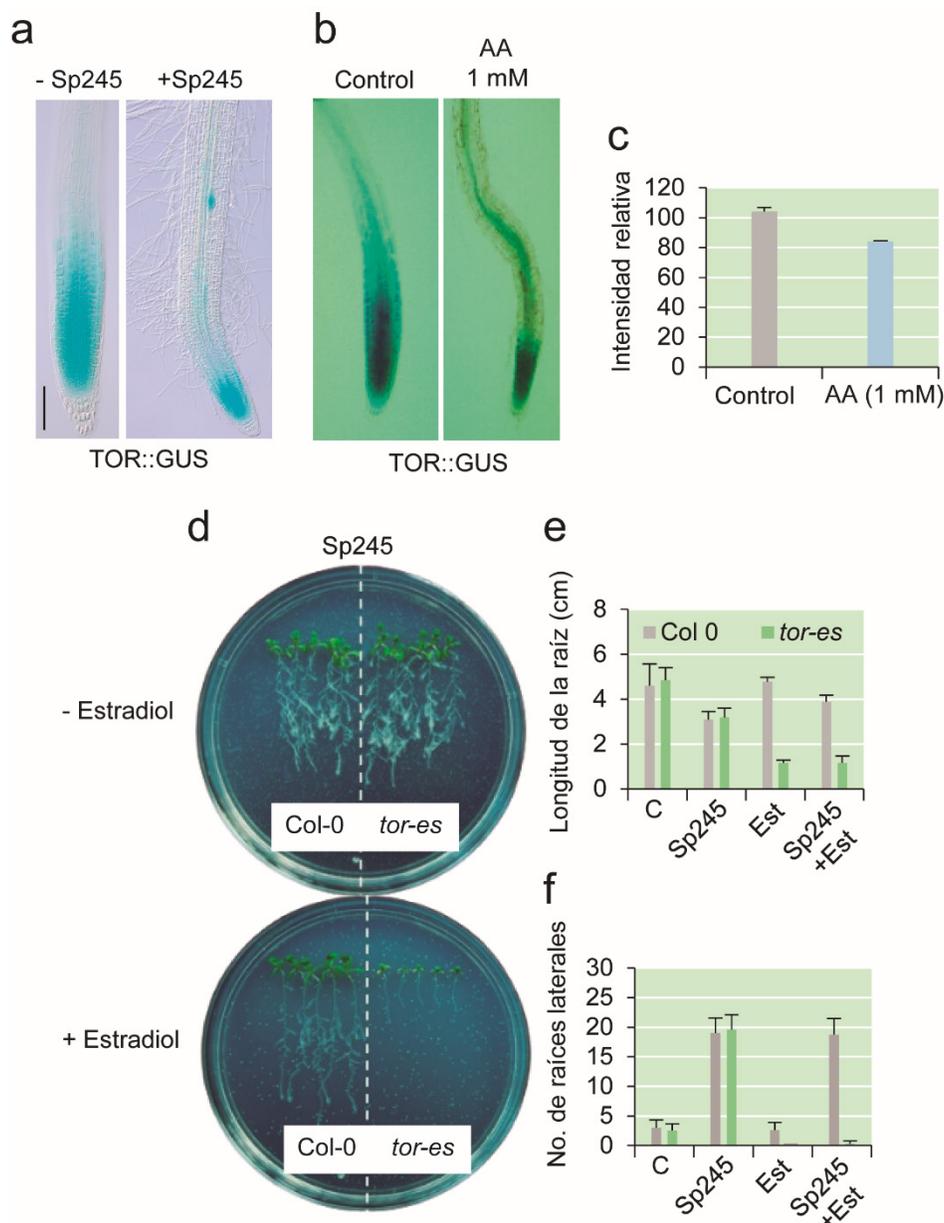
La división celular determina el crecimiento y desarrollo de los tejidos de la planta. A continuación se analizó el efecto de 1 mM de ácido ascórbico y del inhibidor de TOR AZD8055 (1  $\mu$ M) sobre la expresión del reportero de división celular CYCB1;1::GUS en el meristemo de la raíz principal. La expresión del marcador fue visiblemente más baja en presencia de ácido ascórbico que en las plántulas control no tratadas. El inhibidor AZD8055 también inhibió su expresión cuando se aplica solo o en combinación con la rizobacteria (**Fig. 4a**). La inhibición de la división celular correlacionó con menor crecimiento de las plántulas, en aproximadamente un 50 % con ambos tratamientos, en relación con el control (**Fig. 4b, c**).

### **Efecto del peróxido de hidrógeno sobre la expresión y la actividad de TOR**

Para explorar un posible mecanismo de acción del ácido ascórbico en la represión del crecimiento de *Arabidopsis*, se analizó su efecto sobre la producción de peróxido de hidrógeno en la raíz principal. Como primer experimento se analizó la producción de especies reactivas de oxígeno en la raíz de plantas inoculadas con la rizobacteria. Se observó un incremento en su producción en la zona del meristemo de la raíz en plantas inoculadas (**Fig. 5a**). Las plántulas tratadas con 1 mM de ácido ascórbico o 1  $\mu$ M AZD8055 mostraron un aumento en la producción de peróxido de hidrógeno, con un incremento mayor observado con AZD8055 (**Fig. 5b**). Posteriormente, se analizó el efecto de dos concentraciones de peróxido de hidrógeno (0.5 y 1 mM) sobre la



**Figura 2.** Acumulación de ácido ascórbico y su efecto sobre el crecimiento de *Arabidopsis*. **a)** Acumulación de ácido ascórbico en follaje y raíz. **b)** Imágenes de plantas tratadas con diferentes concentraciones de ácido ascórbico. **c-f)** Parámetros del crecimiento de plantas tratadas con AA. AA=ácido ascórbico. n=30.

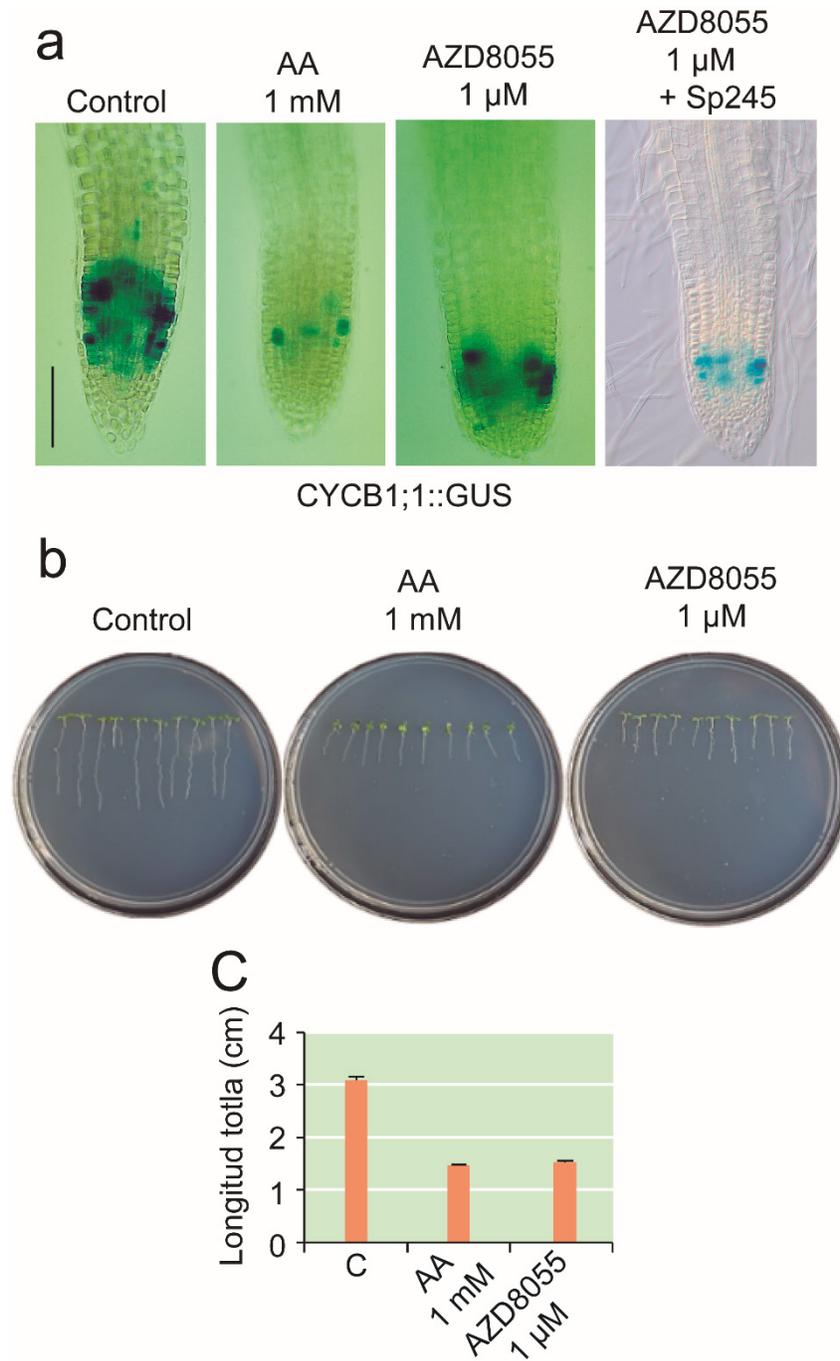


**Figura 3.** Efecto del ácido ascórbico sobre la expresión de TOR en *Arabidopsis*. **a)** Expresión del reportero TOR::GUS en el meristemo de la raíz principal de plantas inoculadas con Sp245 (**a**), o tratadas con ácido ascórbico (**b**, **c**). **d)** Imágenes de plantas silvestres y mutantes *tor-es* tratadas con estradiol e inoculadas con Sp25. (**e**, **f**) Parámetros de crecimiento de la raíz. Barra=200  $\mu$ m. n=30.

expresión de TOR. Con la concentración menor de peróxido de hidrógeno se observó un incremento en la expresión en el meristemo de la raíz, pero con la concentración mayor se notó una disminución en la expresión de aproximadamente 50 %, en relación al control (**Fig. 5c, d**).

También se analizó la actividad de TOR por medio de la fosforilación de la proteína S6K, la cual es un blanco directo de su actividad. Los resultados

mostraron una inhibición de la fosforilación de S6K dependiente de la concentración de peróxido de hidrógeno utilizada (**Fig. 5e**). Además, las dos concentraciones de peróxido de hidrógeno inhibieron el crecimiento de la planta, así como el de los pelos radiculares (**Fig. 5f**). Estos resultados sugieren que el ácido ascórbico podría modificar el crecimiento de *Arabidopsis* modulando la producción o la acumulación de peróxido de hidrógeno.



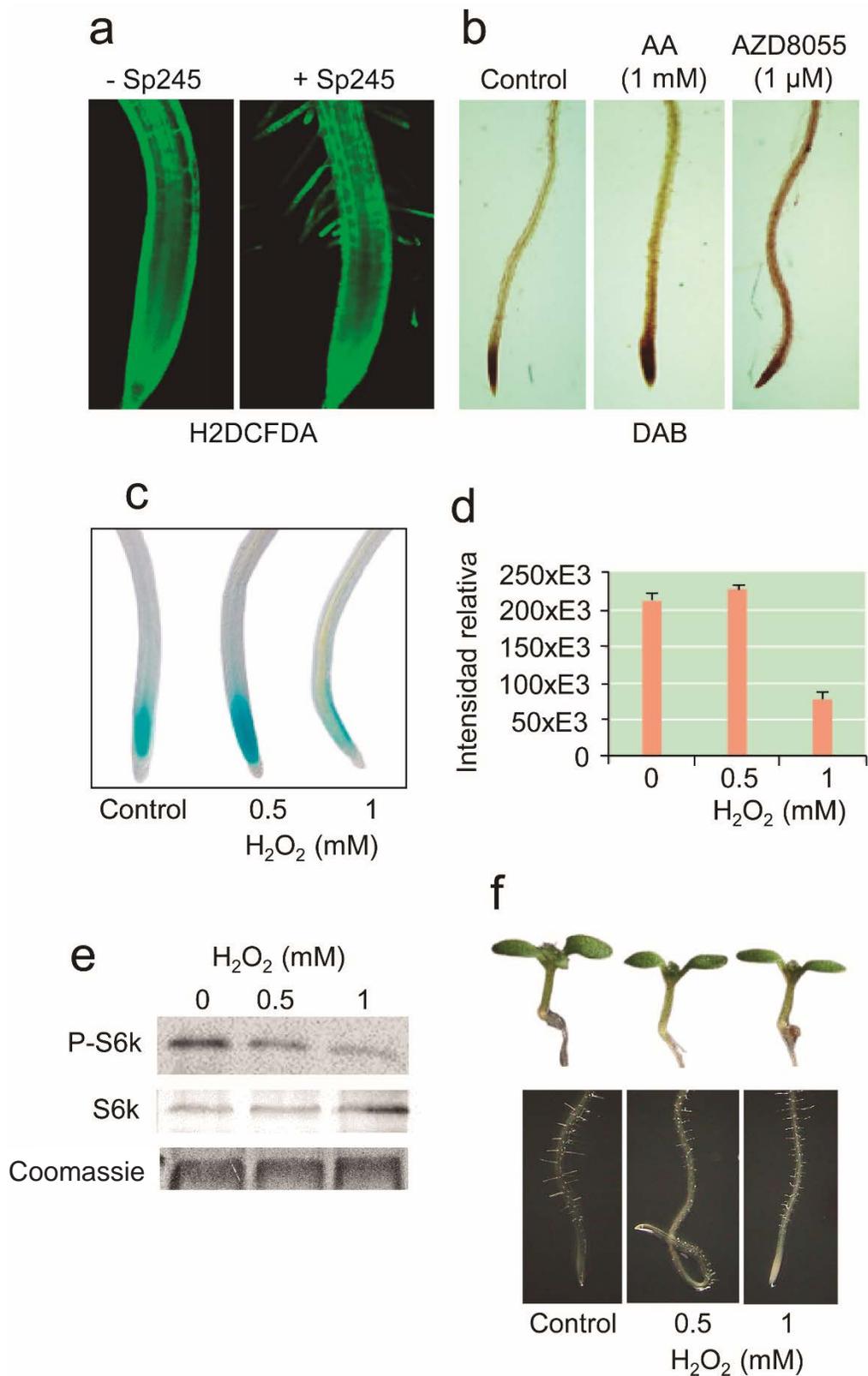
**Figura 4.** Efecto del ácido ascórbico y de la inhibición de TOR por AZD8055 sobre la división celular y el crecimiento de la raíz. **a)** Expresión del reportero de división celular CYCB1;1::GUS en el meristemo de la raíz principal. **(b, c)** Imágenes de plantas crecidas in vitro y longitud total de plantas tratadas con ácido ascórbico y AZD8055. Barra=100 μm. n=30.

## Discusión

El ácido ascórbico es el compuesto antioxidante más abundante, esencial para diversas funciones biológicas en las plantas (Chaturvedi *et al.*, 2022), y desempeña un papel importante en la división

y expansión celular (Zheng *et al.*, 2022). Sin embargo, no se ha analizado su función para la bioestimulación por rizobacterias.

En nuestro estudio, se observó un incremento de ácido ascórbico de aproximadamente 2 veces en el



**Figura 5.** Producción y efecto de peróxido de hidrógeno sobre la expresión y actividad de TOR en la raíz. **a, b)** Análisis de acumulación de peróxido de hidrógeno por tinción del tejido con H2DCFDA y DAB. **(c, d)** Expresión del reportero TOR::GUS en el meristemo de la raíz principal. **e)** Actividad de TOR por fosforilación de S6K. **f)** Crecimiento de plantas tratadas con diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno. n=30, para **e**, n=3.

follaje de *Arabidopsis* en respuesta a la inoculación con *A. baldaniorum* Sp245, y su aplicación inhibió el crecimiento en magnitud dependiente de la concentración utilizada. En el melón (*Cucumis melo* L.) la supresión de ascorbato oxidasa (AO), enzima que cataliza la oxidación de ácido ascórbico a ácido deshidroascórbico, incrementó el contenido de ácido ascórbico en el fruto y se redujo dramáticamente su crecimiento debido a una interferencia con la elongación celular (Chatzopoulou *et al.*, 2020). En *Arabidopsis* la sobre-expresión de la enzima glucuronocinasa, la cual desvía la conversión del ácido glucurónico, un precursor para la síntesis de ácido ascórbico, hacia la síntesis de carbohidratos, mostró una disminución en el contenido de ácido ascórbico, y un incremento en la longitud de la raíz en condiciones de estrés abiótico (Thakur *et al.*, 2023). Uno de los efectos de Sp245 sobre la morfología de la raíz de *Arabidopsis* es una disminución en su crecimiento y un incremento en la formación de raíces laterales. Estos datos sugieren que Sp245 podría modular la bioestimulación de *Arabidopsis* a través de los cambios en los niveles de ácido ascórbico.

Posteriormente, nuestro estudio se enfocó en explorar el mecanismo por el cual el ácido ascórbico podría disminuir el crecimiento de *Arabidopsis*. TOR es una cinasa clave en la ruta metabólica que regula el crecimiento celular (Reyes de la Cruz *et al.*, 2004), por lo tanto, se analizó el efecto de ácido ascórbico sobre la expresión de TOR. Se observó que la expresión de la cinasa disminuyó en respuesta al tratamiento con ácido ascórbico. Esta disminución podría correlacionar con el incremento en la acumulación de ácido ascórbico y la disminución del crecimiento de *Arabidopsis* por Sp245, con la actividad de TOR. Esta posibilidad se sustenta por los resultados observados con la inhibición de la expresión de TOR utilizando las plantas de la línea *tor-es* en la interacción planta-bacteria. En esta línea no se observó la bioestimulación de *Arabidopsis* ante la represión de TOR, sugiriendo que esta enzima es importante para las respuestas a la rizobacteria.

La ruta metabólica de TOR modula la división celular regulando la transición G1/S del ciclo

celular (Ahmad *et al.*, 2019). Así, para estudiar con más detalle el efecto del ácido ascórbico sobre esta ruta, se analizó la expresión de la ciclina B1;1 en respuesta al tratamiento con esta molécula. El ácido ascórbico disminuyó la expresión de la ciclina notablemente. Además, esta disminución fue observada en el tratamiento con el inhibidor de TOR AZD8055. Estos resultados fueron consistentes con una disminución en el crecimiento de *Arabidopsis*. Lo anterior sugiere que la disminución en el crecimiento de *Arabidopsis* por ácido ascórbico es probablemente debido a la inhibición de la actividad de TOR, que a su vez bloquea la división celular.

El mecanismo de acción del ácido ascórbico sobre la ruta metabólica de TOR aún se desconoce, tanto en animales como en plantas. El ácido ascórbico es un metabolito con propiedades antioxidantes que regula los niveles de especies reactivas de oxígeno (ERO) en la célula (Chaturvedi *et al.*, 2022). Considerando lo anterior, se analizó su efecto sobre la acumulación de peróxido de hidrógeno en la raíz de *Arabidopsis*. Su adición incrementó la acumulación de peróxido de hidrógeno, y disminuyó la expresión de TOR en la concentración más alta utilizada (1 mM). Además, el peróxido de hidrógeno inhibió la fosforilación de la proteína S6K, el blanco inmediato de TOR en la ruta metabólica. Estos efectos sobre TOR correlacionaron con una disminución en el crecimiento de *Arabidopsis*. El ácido ascórbico es un potente antioxidante que dona electrones a los radicales libres, estabilizándolos y previniendo el daño celular (Carr y Frei, 1999). Sin embargo, en presencia de iones de metales de transición (como hierro y cobre) o en altas concentraciones, el ácido ascórbico puede reducir estos metales, lo que lleva a la generación de radicales libres mediante reacciones de Fenton. Esta actividad pro-oxidante puede provocar estrés oxidativo (Buettner y Jurkiewicz, 1996). El equilibrio entre su función antioxidante y pro-oxidante depende del entorno biológico y químico específico. Así, es probable que en nuestro estudio la concentración utilizada y el tiempo de exposición estén favoreciendo la actividad pro-oxidante del ácido ascórbico, aumentando la producción de peróxido de hidrógeno en la raíz. Este efecto podría ser el responsable de

la inhibición de la ruta de TOR por ácido ascórbico, del desarrollo y la disminución del crecimiento de las plantas.

El ácido ascórbico tiene un papel importante en la interacción de las rizobacterias con las plantas. En chícharo, se estudió la actividad de *Rhizobium* y la aplicación de ácido ascórbico sobre el incremento en el tamaño de la raíz y la productividad de la planta. En la concentración de 200 ppm de ácido ascórbico se notó un incremento en el crecimiento vegetativo, en el número de vainas por planta, en el número de semillas y en los parámetros bioquímicos de clorofila y carotenoides (Kamran *et al.*, 2023), lo que sugiere que el ácido ascórbico mejora el resultado de la interacción.

El ácido ascórbico también podría favorecer la actividad de bacterias benéficas a través de su capacidad antioxidante, disminuyendo la producción de especies reactivas de oxígeno. En la interacción entre *Azotobacter chroococcum* Avi2 con el arroz, altas concentraciones de peróxido de hidrógeno (2.5 mM-4.5 mM) mostraron una alta mortalidad de Avi2, pero cuando se adiciona 1 ppm de ácido ascórbico se neutraliza su efecto. También se incrementó la actividad de las enzimas relacionadas con el metabolismo del peróxido de hidrógeno, y los porcentajes de germinación se incrementaron en comparación con la aplicación de peróxido de hidrógeno solo. Estos datos sugieren que el ácido ascórbico neutraliza el estrés oxidativo provocado por el peróxido de hidrógeno e incrementa la eficacia de Avi2 sobre la planta (Kumar *et al.*, 2019). En conclusión, nuestros datos muestran que el ácido ascórbico está relacionado con los cambios morfológicos promovidos por Sp245 en *Arabidopsis*.

## Referencias

Ahmad Z, Magyar Z, Bögre L, Papdi C (2019). Cell cycle control by the target of rapamycin signalling pathway in plants: *Journal of Experimental Botany* 70:2275-2284. doi:10.1093/jxb/erz140.

Apel K, Hirt H (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, signal transduction: *Annual Review of Plant Biology* 55:373-399. doi:10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701.

Buettner GR, Jurkiewicz BA (1996). Catalytic metals, ascorbate free radicals: combinations to avoid: *Radiation Research* 145:532-541.

Carr AC, Frei B (1999). Toward a new recommended dietary allowance for vitamin C based on antioxidant health effects in humans: *The American Journal of Clinical Nutrition* 69:1086-1107.

Carro L, Torres R, Trujillo ME (2018). *Azospirillum baldaniorum* sp. nov., a nitrogen-fixing bacterium isolated from a biopurification system on a herbicide-producing plant factory: *Intentional Journal of Systematic Evolutionary Microbiology* 68:1240-1245. doi:10.1099/ijsem.0.002648.

Chaturvedi S, Khan S, Bhunia RK, *et al.* (2022). Metabolic engineering in food crops to enhance ascorbic acid production: crop biofortification perspectives for human health: *Physiological Molecular Biology of Plants* 28:871-884. doi:10.1007/s12298-022-01172-w.

Chatzopoulou F, Sanmartin M, Mellidou I, Pateraki I, Koukounaras A, Tanou G, Kalamaki MS, Veljović-Jovanović S, Antić TC, Kostas S, Tsouvaltzis P, Grume, t R., Kanellis AK (2020). Silencing of ascorbate oxidase results in reduced growth, altered ascorbic acid levels ripening pattern in melon fruit: *Plant Physiology Biochemistry* 156:291-303. doi:10.1016/j.plaphy.2020.08.040.

Claeys H, Van Landeghem S, Dubois M, Maleux K, Inzé D (2014). What is stress? Dose-response effects in commonly used *in vitro* stress assays. *Plant Physiology* 165, 519-527. doi:10.1104/pp.113.234641.

Colon-Carmona A, You R, Haimovitch-Gal T, Doerner P (1999). Spatio-temporal analysis of mitotic activity with a labile cyclin-GUS fusion protein: *Plant Journal* 20:503-508.

Crespo JL, Díaz-Troya S, Florencio FJ (2005). Inhibition of target of rapamycin signaling by rapamycin in the unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii*: *Plant Physiology* 139:1736-1749. doi:10.1104/pp.105.067744.

Davies SHR., Masten SJ (1991). Spectrophotometric method for ascorbic acid using dichlorophenolindophenol: elimination of the interference due to iron: *Analytica Chimica Acta* 248:225-227. doi:10.1016/S0003-2670(00)80888-0.

Foyer CH, Noctor G (2011). Ascorbate glutathione: the heart of the redox hub: *Plant Physiology* 155:2-18. <https://doi.org/10.1104/pp.110.167569>.

Gullner G, Komives T, Király L, Schröder P (2018). Glutathione S-transferase enzymes in plant-pathogen interactions: *Frontiers in Plant Science* 9:1836. doi:10.3389/fpls.2018.01836.

- Kamran A, Mushtaq M, Arif M, Rashid S (2023). Role of biostimulants (ascorbic acid fulvic acid) to synergize *Rhizobium* activity in pea (*Pisum sativum* L. var. Meteor): *Plant Physiology Biochemistry* 196:668-682. doi:10.1016/j.plaphy.2023.02.018.
- Kim YC, Leveau J, McSpadden Gardener BB, Pierson EA, Pierson LS, Ryu CM (2014). The multifactorial basis for plant health promotion by plant-associated bacteria: *Applied Environmental Microbiology* 77:1548-1555. doi:10.1128/AEM.01867-10.
- Kumar U, Kaviraj M, Panneerselvam P, Priya H, Chakraborty K, Swain P, Chatterjee SN, Sharma SG, Nayak PK, Nayak AK (2019). Ascorbic acid formulation for survivability diazotrophic efficacy of *Azotobacter chroococcum* Avi2 (MCC 3432) under hydrogen peroxide stress its role in plant-growth promotion in rice (*Oryza sativa* L.): *Plant Physiology Biochemistry* 139:419-427. doi:10.1016/j.plaphy.2019.04.003.
- Li C, Jia H, Chai Y, et al. (2018). *Arabidopsis* root growth inhibition by 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, but not by naphthaleneacetic acid, depends on ethylene-mediated signaling: *Frontiers in Plant Science* 10:918. doi:10.3389/fpls.2019.00918.
- Li X, Ye J, Munir S, Yang T, Chen W, Liu G, Zheng W, Zhang Y (2019). Biosynthetic gene pyramiding leads to ascorbate accumulation with enhanced oxidative stress tolerance in tomato: *International Journal of Molecular Science* 20:1558. doi:10.3390/ijms20071558.
- Malamy JE, Benfey PN (1997). Organization cell differentiation in lateral roots of *Arabidopsis thaliana*: *Development* 124:33-44. doi:10.1242/dev.124.1.33.
- MenB, Desnos T, Nussaume L F Berger, Bouchez D, Meyer C, Robaglia C (2002). Expression disruption of the *Arabidopsis* TOR (target of rapamycin) gene: *Proceedings National Academy of Sciences U S A*. 99:6422–6427.
- Mittler R, Vanderauwera S, Gollery M, Van Breusegem F (2004). Reactive oxygen gene network of plants: *Trends in Plant Science* 9:490-498. doi:10.1016/j.tplants.2004.08.009.
- Reyes de la Cruz H, Aguilar R, Sanchez de Jimenez E. (2004). Functional characterization of a maize ribosomal S6 protein kinase (ZmS6K), a plant ortholog of metazoan p70(S6K): *Biochemistry* 43:533–539.
- Smirnoff N, Wheeler GL (2000). Ascorbic acid in plants: Biosynthesis function: *Critical Reviews in Biochemistry Molecular Biology* 35:291-314. doi:10.1080/10409230008984166.
- Thakur N, Flowerika, Chaturvedi S, Tiwari S (2023). Wheat derived glucuronokinase as a potential target for regulating ascorbic acid phytic acid content with increased root length under drought ABA stresses in *Arabidopsis thaliana*: *Plant Science* 331:111671. doi:10.1016/j.plantsci.2023.111671.
- Thordal-Christensen H, Zhang Z, Wei Y, Collinge DB (1997). Subcellular localization of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in plants. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> accumulation in papillae hypersensitive response during the barley—powdery mildew interaction: *Plant Journal* 11:1187–94
- Veljovic-Jovanovic S, Noctor G, Foyer CH (2002). Are leaf hydrogen peroxide concentrations commonly overestimated? The potential influence of artefactual interference by tissue phenolics ascorbate. *Plant Physiology Biochemistry* 40:501-507. doi:10.1016/S0981-9428(02)01313-0.
- Xiong Y, Sheen J (2012). Rapamycin glucose-target of rapamycin (TOR) protein signaling in plants: *Journal of Biological Chemistry* 287:2836-42. doi:10.1074/jbc.M111.300749.
- Zhang Z, Zhu JY, Roh J, Marchive C, Kim SK, Meyer C, Sun Y, Wang W, Wang ZY (2016). TOR signaling promotes accumulation of BZR1 to balance growth with carbon availability in *Arabidopsis*: *Current Biology* 26:1854-60. doi:10.1016/j.cub.2016.05.005.
- Zheng X, Gong M, Zhang Q, Tan H, Li L, Tang Y, Li Z, Peng M, Deng W. (2022). Metabolism regulation of ascorbic acid in fruits: *Plants* 11:1602. doi:10.3390/plants11121602.
- Zheng Z, Wang Z, Wang X, Liu D (2019). Blue light-triggered chemical reactions underlie phosphate deficiency-induced inhibition of root elongation of *Arabidopsis* seedlings grown in Petri dishes: *Molecular Plant* 12:1515–1523. doi:10.1016/j.molp.2019.08.001.



# Elaboración de un material compuesto para la fabricación de sensores mecánicos

## Development of a composite material for the manufacture of mechanical sensors

José Ignacio Ramírez\*, Juan Felipe Soriano Peña, Carlos Manuel Sánchez González, Miguel Villagómez Galindo

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### Historial

Manuscrito recibido: 16 de agosto de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

José Ignacio Ramírez

e-mail: 1214885b@umich.mx

### Resumen

En el presente trabajo, se propone un material compuesto de silicona y fibra de carbono para su aplicación en sensores de vibraciones, empleados en rotores y apoyos de maquinarias y mecanismos, con la finalidad de detectar y prevenir fallas de funcionamiento. Se fabricaron probetas variando la proporción de fibra de carbono y silicón, a las cuales se les realizaron ensayos destructivos de compresión para obtener propiedades como el Módulo de Young, el coeficiente de Poisson, la densidad y la resistencia eléctrica. Con estos resultados, se realizaron análisis modales por el método de elemento finito empleando el software ANSYS, ya que es importante evitar que el material entre en resonancia con el sistema que se va a medir. Los resultados muestran que el porcentaje de fibras de carbono influye de manera directa en las propiedades del compuesto, aumentando la rigidez con el contenido de fibra de carbono. Se demuestra que es posible crear sensores de este material compuesto para detectar vibraciones mecánicas.

**Palabras clave:** fibra de carbono, vibraciones, sensor, piezoresistividad.

### Introducción

El estudio de la fibra de carbono ha ido en aumento en los últimos años por sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, de fricción, entre otras (Islam *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2019), y que están directamente relacionadas con aplicaciones industriales en la ingeniería biomédica, la biotecnología, el sector aeroespacial, e incluso en la fabricación de sensores y actuadores.

Los sensores fabricados a partir de fibra de carbono aprovechan una propiedad llamada

### Abstract

In this work, a silicone and carbon fiber composite material is proposed for application in vibration sensors used in rotors and supports of machinery and mechanisms, with the purpose of detecting and preventing malfunctions. Probes were manufactured by varying the proportion of carbon fiber and silicon, on which destructive compression tests were carried out to obtain properties such as Young's Modulus, Poisson's coefficient, density and electrical resistance. With these results, modal analyzes were carried out by the finite element method using the ANSYS software, since it is important to prevent the material from entering into resonance with the system to be measured. The results show that the percentage of carbon fibers directly influences the properties of the composite, increasing the stiffness with the carbon fiber content. Thus, it is possible to create sensors from this composite material to detect mechanical vibrations.

**Keywords:** carbon fiber, vibrations, sensor, piezoresistivity.

piezoresistividad, lo que se traduce como el cambio de conductividad eléctrica al presentarse una deformación, así que la fuerza aplicada al material se convierte en diferentes señales eléctricas. Desde el primer reporte del efecto piezoresistivo de la fibra de carbono en 1969 (Conor y Owston, 1969) se le ha estudiado para la fabricación de sensores de presión, deformación, carga, vibración etc. (Huang *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 1999; Okamoto *et al.*, 2023).

La fabricación de sensores elaborados a base de fibra de carbono ha ido en aumento en los últimos

años debido a su estructura y procedimiento de fabricación simples y un circuito de lectura fácil que permite una producción masiva de sensores (Farhath y Samad, 2020). Con la gran versatilidad que tienen pueden ser utilizados tanto en el sector industrial, civil e incluso en el sector salud y esto es debido principalmente a su flexibilidad en comparación con otro tipo de sensores (ópticos, capacitivos e inductivos), ya que las nuevas tecnologías necesitan que los sensores se adapten en el exterior de curvas complejas (Chen *et al.*, 2021).

El monitoreo del estado de los equipos mecánicos es una herramienta que ayuda a detectar problemas o fallas en los mismos, y ha generado un gran impacto en la industria por sus beneficios económicos y su capacidad para diagnosticar de manera temprana un posible daño a los sistemas. Por lo tanto, la identificación y análisis de fallos mejora el rendimiento del sistema y evita que se presenten futuros inconvenientes. Así, es necesario implementar sensores en las máquinas que registren continuamente parámetros como las vibraciones, temperatura, presión, entre otros, especialmente en las que se encuentran con difícil acceso para predecir tanto el tiempo de vida útil de los elementos como identificar alguna falla imprevista y así evitar mantenimientos no previstos que afectan la producción.

## Materiales y métodos

Para el análisis del comportamiento del compuesto flexible a base de silicona y fibras de carbono (**Figura 1**), se realizaron 3 diferentes tipos de probetas, cada una con un porcentaje diferente de fibras de carbono, la relación geométrica de las probetas es de 1:2 (1 pulgada de diámetro por 2 pulgadas de largo) y son denominadas como C100, C70 y C50. La denominación “C” es por compuesto y 50 por el porcentaje de fibra en adición, para el compuesto C50, por ejemplo, por cada gramo de silicona incluyendo el diluyente y catalizador se adiciona medio gramo de microfibras de carbono. El procedimiento de la fabricación inicia con la preparación de la silicona RTV incluyendo un 15% de aceite de silicona como diluyente y 1.5% de catalizador líquido, se mezcló y se sometió a un proceso de extracción de burbujas de aire utilizando

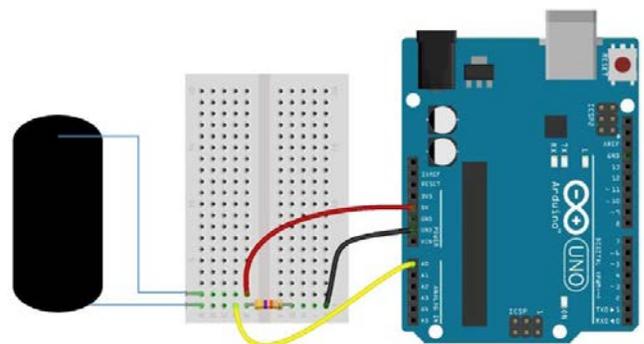


**Figura 1.** Probetas de silicona y fibra de carbono.

un cámara de vacío a 23 in-Hg. Posteriormente, se adicionó el porcentaje de fibras indicadas para cada probeta. El compuesto se inyectó en un molde y se dejó vulcanizar por 72 h (Sánchez-González *et al.*, 2020).

El material flexible que se realizó tiene como finalidad actuar como un sensor de vibración por lo que es importante realizar un análisis modal, ya que se debe evitar que el material entre en resonancia con el sistema que se va a medir. Este análisis se realizó por el método de elementos finitos con la ayuda del software ANSYS, para dicho análisis es necesario conocer diferentes propiedades del material como lo son: el módulo de Young, el módulo de Poisson y la densidad, para dichas propiedades se realizaron ensayos destructivos de compresión.

La lectura de datos se realiza con un microcontrolador (para este caso en particular se utiliza un Arduino Uno) el cual se conecta al compuesto como se muestra en la **Figura 2**, el microcontrolador es alimentado por medio del cable USB con un voltaje de 5V, el sensor es alimentado



**Figura 2.** Diagrama de conexión.

por el microcontrolador a través de una de sus conexiones de alimentación de 5V y una de sus salidas a tierra GND estando esta última conectada en serie a un a resistencia, esto para reducir la corriente en el circuito, y por último conectado en paralelo con la resistencia y el sensor el cable de la señal se conecta a la entrada analógica A0 (**Figura 2**).

## Resultados

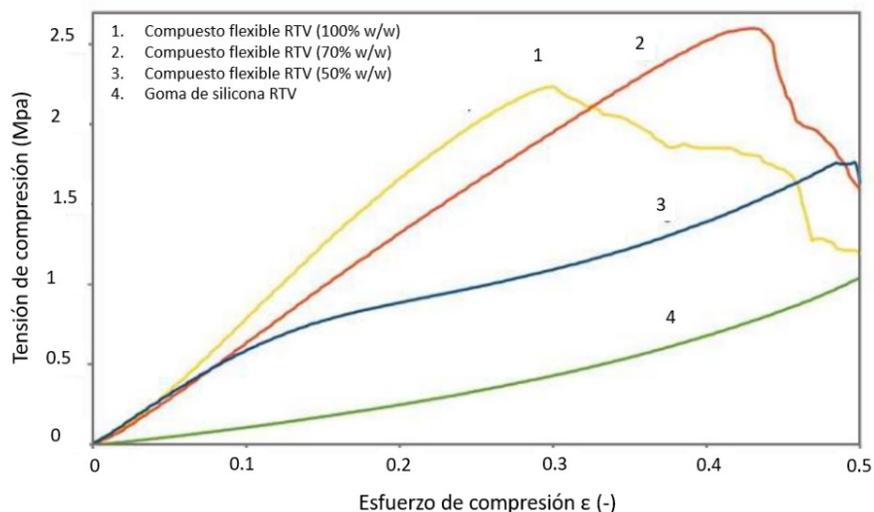
La piezoresistividad de los compuestos flexibles puede ser determinada mediante un conjunto de ensayos que someten al material a cambios físicos, estos modifican su conductividad e impedancia, por ejemplo, la temperatura, los campos eléctricos, magnéticos, las ondas vibratorias, y las cargas estáticas, así como las fuerzas ejercidas a tracción y compresión. Al cambiar la forma física su resistividad específica cambia y por consecuencia su impedancia total (Sánchez-González *et al.*, 2020).

En las curvas obtenidas del ensayo de compresión que se muestra en la **Figura 3** se observa el comportamiento de deformación debido a la fuerza de compresión ejercida. Este ensayo destructivo considera una deformación lineal del 50% de la probeta. La curva, muestra el comportamiento del material flexible C100 que es el que tiene mayor cantidad de fibras de carbono, presentando una mayor rigidez, por tal razón, la matriz del compuesto

tiene una tendencia mayor al desgarre, a presentar deformaciones plásticas y grietas a un esfuerzo de compresión  $-\epsilon=0.2$ , inicialmente presenta fallo del tipo “Barreling”, agrietamiento y formación de grandes cúmulos, posteriormente falla por fractura frágil a  $-\epsilon=0.3$  que es más del 30% de la deformación lineal de la probeta. En la figura 5 la curva cuatro representa a una probeta cilíndrica fabricada sin fibras de carbono y posee la menor rigidez, es más flexible, su matriz tiene menos tendencia al desgarre y puede deformarse más del 50% de su longitud inicial, con  $-\epsilon=0.5$  se aprecia una deformación plástica pequeña y falla “Barreling”. Las curvas 2 y 3 de la **Figura 3**, muestran fallas a mayor valor de deformación respecto a la de mayor rigidez C100, evidentemente por su menor contenido de fibras de carbono (Sánchez-González *et al.*, 2020).

En la **Figura 4** se observan los resultados del ensayo sobre comportamiento resistivo del compuesto para tres probetas con diferente contenido de fibras de carbono respecto a la fuerza de compresión ejercida, que produce una deformación elástica en el compuesto, afectando su resistencia eléctrica y presentando un comportamiento piezoresistivo.

Dadas las curvas obtenidas en los ensayos se realizó un ajuste en las curvas para determinar los valores del módulo de Young y el coeficiente de Poisson además de determinar las densidades de los compuestos, dichos valores se muestran en la **Tabla 1** y **Figura 5**.



**Figura 3.** Ensayo destructivo a compresión de cuatro probetas de compuesto flexible.

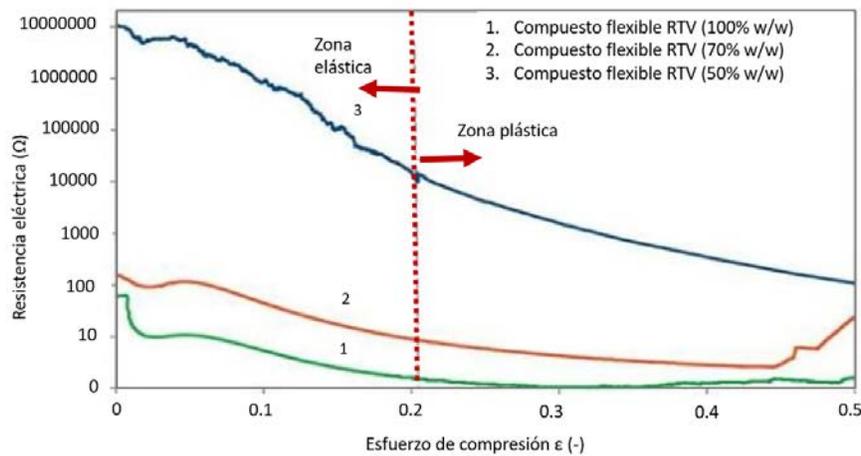
**Tabla 1.** Propiedades de las probetas

Espécimen	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
C100	8.2	0.2	1445.218
C70	6.5	0.2	1262
C50	3.06	0.2	1321.37

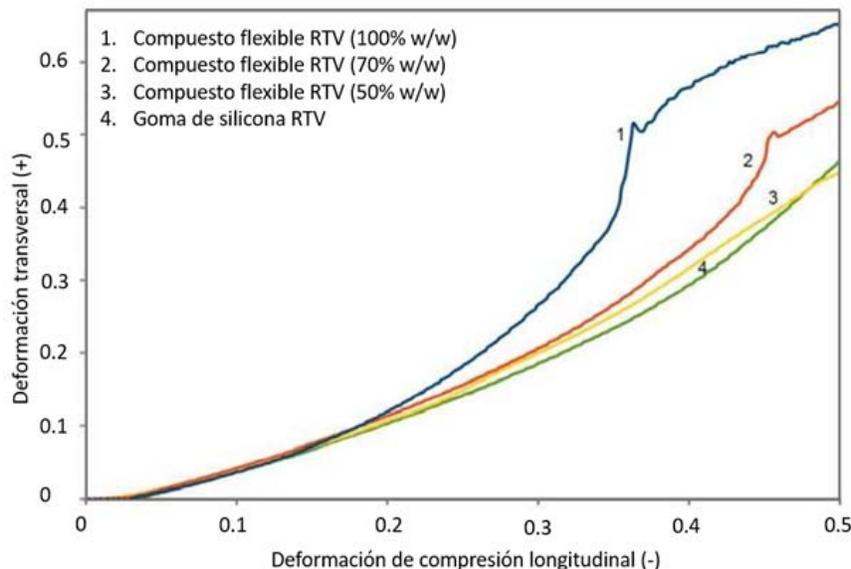
Para el análisis modal se modeló una geometría para los 3 especímenes ya tienen las mismas dimensiones (1 in de diámetro por 2 in de largo), el modelado se realizó en el software ANSYS como se muestra en la **Figura 6a**.

El mallado de la probeta se realizó de igual manera con el software ANSYS, usando el método de multizone con hexa/prism como tipo de malla asignada con un tamaño promedio de elemento de 0.7 mm **Figura 6b**. Para realizar el análisis modal se especificó la base de la probeta como un soporte fijo, para este tipo de análisis no es necesaria la aplicación de alguna fuerza externa.

El análisis modal para los especímenes C100, C70 y C50 muestra un total de 4 modos de vibración para cada espécimen como se muestra en la **Tabla 2**, el primer modo de vibración es denominado modo fundamental y coincide con la frecuencia natural de



**Figura 4.** Ensayo de compresión de tres cilindros de compuesto flexible piezoresistivo con diferente piezoresistividad específica.



**Figura 5.** Coeficiente de Poisson.

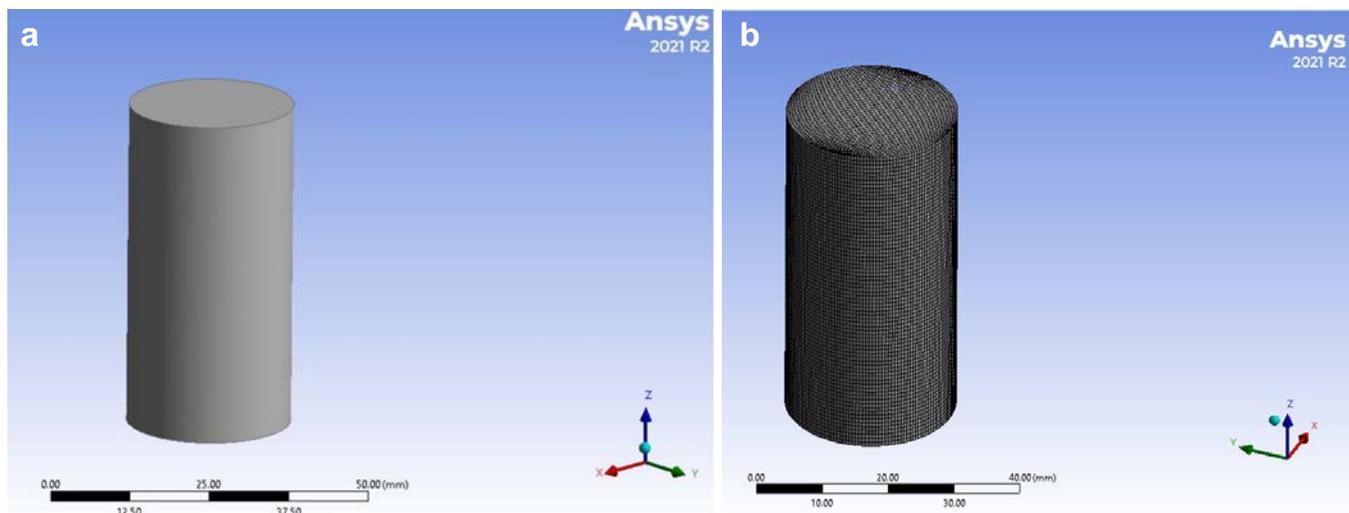


Figura 6. Análisis modal en ANSYS, a) modelo de la probeta, b) mallado de la probeta.

Tabla 2. Frecuencias de los modos de vibración

Valores de Frecuencia en Hz					
C100		C70		C50	
1°	91.054	1°	86.49	1°	57.995
2°	234.47	2°	222.72	2°	149.34
3°	364.77	3°	346.48	3°	232.33
4°	378.13	4°	359.18	4°	240.84

la probeta, es decir a la que responderá de forma prioritaria.

### Conclusiones

Como era de esperarse el porcentaje de fibras de carbono influye de manera directa en las propiedades del compuesto, se puede observar que la rigidez del compuesto es directamente proporcional a la cantidad de fibras de carbono; entre mayor sea la cantidad de fibras mayor será la rigidez de este, por lo que se debe establecer la mejor combinación del compuesto. Es posible fabricar un sensor capaz de detectar las vibraciones mecánicas ya que con la propiedad de piezorresistividad que posee el material se puede detectar la variación en la deformación de este por medio de cambios de voltaje pudiéndose asociar al incremento de la amplitud de la onda de la vibración dada por el desgaste o daño en alguno de los componentes del sistema.

### Referencias

Chen X, Zeng Q, Shao J, Li S, Li X, Tian H, Liu G, Nie B, Luo Y (2021). Channel-crack-designed suspended sensing membrane as a fully flexible vibration sensor with high sensitivity and dynamic range. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13(29):34637–34647. doi:10.1021/acsami.1c09963.

Conor PC, Owston CN (1969). Electrical resistance of single carbon fibres. *Nature* 223(5211):1146–1147. doi:10.1038/2231146b0.

Farhath M, Samad M F. (2020). Design and simulation of a high sensitive stripped-shaped piezoresistive pressure sensor. *Journal of Computational Electronics* 19(1):310–320. doi:10.1007/s10825-019-01429-w.

Huang J, Yang X, Liu J, Her S, Guo J, Gu J, Guan L (2020). Vibration monitoring based on flexible multi-walled carbon nanotube/polydimethylsiloxane film sensor and the application on motion signal acquisition. *Nanotechnology* 31(33):335504. doi:10.1088/1361-6528/ab8edd.

Islam M, Sadaf A, Gómez MR, Mager D, Korvink JG, Lantada AD (2021). Carbon fiber/microlattice 3D hybrid architecture as multi-scale scaffold for tissue engineering. *Materials Science and Engineering C* 126:112140. doi:10.1016/j.msec.2021.112140.

Lin L, Chu H-C, Lu Y-W (1999). A simulation program for the sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems* 8(4):514–522. doi:10.1109/84.809067.

Okamoto Y, Nguyen T-V, Takahashi H, Takei Y, Okada H, Ichiki M (2023). Highly sensitive low-frequency-detectable acoustic sensor using a piezoresistive cantilever for health

monitoring applications. *Scientific Reports* 13(1):6503. doi:10.1038/s41598-023-33568-3.

Sánchez-González CM, Soriano-Peña J-F, Rubio-Avalos JC, Pacheco-Ibarra JJ (2020). Fabrication of flexible piezoresistive sensors based on RTV-silicone and milled carbon fibers and the temperature's effect on their electric resistance. *Sensors and Actuators A: Physical* 302:111811. doi:10.1016/j.sna.2019.111811.

Wang Y, Zhao X, Wen D (2020). Fabrication and characteristics of a three-axis accelerometer with double L-shaped beams. *Sensors* 20(6):1780. doi:10.3390/s20061780.

Yao Y, Luo J, Duan X, Liu T, Zhang Y, Liu B, Yu M (2019). On the piezoresistive behavior of carbon fibers - Cantilever-based testing method and Maxwell-Garnett effective medium theory modeling. *Carbon* 141:283–290. doi:10.1016/j.carbon.2018.09.043.



# Evaluación energética y factibilidad económica de la integración de un ciclo de refrigeración por absorción y turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico de baja temperatura geotérmica

## Energy evaluation and economic feasibility of the integration of an absorption refrigeration cycle and a Tesla turbine in the heat recovery of a low-temperature geothermal organic Rankine cycle

Héctor Isaac Cardoza Villegas<sup>1</sup>, Aneth Lizbeth Trejo Marmolejo<sup>1</sup>, Carlos David González Gachupin<sup>1</sup>, Oscar Chavez<sup>2</sup> , Israel Y. Rosas<sup>2</sup> , Víctor M. Ambriz Diaz<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Estudiante Ingeniería Electromecánica, Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México

<sup>2</sup> Profesor Investigador, Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México

### Historial

Manuscrito recibido: 28 de junio de 2024

Manuscrito aceptado: 22 de agosto de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Víctor M. Ambriz Diaz

e-mail: victor.ad@chihuahua.tecnm.mx

ORCID: 0000-0002-2314-2314

### Resumen

En este trabajo se presenta la evaluación energética y factibilidad económica de integración de un ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto y una turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico activado con energía geotérmica de baja temperatura. El fluido geotérmico activa el sistema en condiciones de agua líquida saturada y a razón de 10 kg/s y una temperatura de 90 °C. Se establecen los modelos para la evaluación energética a partir del primer principio de la termodinámica y del principio de conservación de la masa. Los resultados indican que el sistema integrado con las tres tecnologías puede lograr una producción de potencia de 52.94 kW y una eficiencia general de utilización de la energía de 20.31%. Finalmente, la inversión inicial ha resultado muy alta, por lo que, la implementación práctica de este proyecto solamente se justifica por la utilización de energía limpia de una manera eficiente.

**Palabras clave:** Energía geotérmica, recuperación de calor, ciclo Rankine orgánico, refrigeración por absorción, turbina Tesla.

### Introducción

La energía geotérmica, es el calor almacenado en el interior de la corteza terrestre y se puede clasificar de manera general en recursos geotérmicos de alta, media y baja temperatura. Los recursos geotérmicos de alta temperatura ( $T > 150$  °C y  $T < 300$  °C) son co-

### Abstract

This work presents the energy evaluation and economic feasibility of integrating a medium-effect absorption refrigeration cycle and a Tesla turbine in the heat recovery of an organic Rankine cycle activated with low-temperature geothermal energy. The geothermal fluid activates the system under conditions of saturated liquid water at a rate of 10 kg/s and a temperature of 90 °C. The models for energy evaluation are established based on the first principle of thermodynamics and the principle of conservation of mass. The results indicate that the system integrated with the three technologies can achieve a power production of 52.94 kW and an overall energy utilization efficiency of 20.31%. Finally, the initial investment has been very high, so the practical implementation of this project is only justified by the efficient use of clean energy.

**Keywords:** Geothermal energy, heat recovery, organic Rankine cycle, absorption cooling, Tesla turbine.

múnmente empleados en la producción de electricidad (Aghahosseini y Breyer 2020). Mientras que los recursos de media y baja temperatura ( $T < 150$  °C) también pueden ser implementados en la generación de electricidad utilizando ciclos binarios (Alimonti *et al.*, 2021). Entre estos ciclos se distin-

que como tecnología primordial los ciclos Rankine orgánicos (ORC) de baja temperatura. Estos ciclos se encuentran dentro de los pocos sistemas termodinámicos que ofrecen la capacidad de transformar la energía presente en forma de calor de baja temperatura (a partir de los 60 °C) a partir de sus elementos básicos; caldera, turbina, condensador y bomba, así como de un fluido de trabajo de origen orgánico (Ahmadi *et al.*, 2020).

Comúnmente, cuando se tiene el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja temperatura, los ORC son integrados con otros tipos de tecnologías de recuperación de calor residual, esto para incrementar la viabilidad del aprovechamiento de la energía geotérmica. Dentro de la limitada categoría de tecnologías encargadas de la transformación de energía residual, se encuentra el Ciclo de Refrigeración por Absorción (ARC) (Maragna *et al.*, 2024). Esta tecnología se define como un ciclo termodinámico capaz de producir frío a partir de calor. Por lo que los ARC pueden generar frío a partir del calor geotérmico e incrementar el rendimiento general de los sistemas geotérmicos cuando se acoplan en la recuperación de calor residual. En la actualidad existen diferentes tipos de configuraciones de ARC; efecto único, doble efecto, medio efecto y efectos múltiples, entre otros (Srikhirin *et al.*, 2001). Sin embargo, el criterio principal de integración de los ARC en los sistemas geotérmicos, es la temperatura de activación. La mayoría se activan con un fluido geotérmico que se encuentra a temperaturas superiores a los 100 °C (Gong *et al.*, 2021), excepto el ARC de único efecto y medio efecto. No obstante, el ARC candidato para la recuperación de calor residual de baja temperatura, es el ARC de medio efecto (Loreti *et al.*, 2019). Así, el producto frigorífico del ARC de medio efecto puede lograrse desde 80 °C, y puede usarse para aplicaciones de confort o para lograr una menor temperatura de condensación del ORC. De esta forma, se logra incrementar la producción de electricidad del ORC y se garantiza una operación más estable (Ambriz-Díaz *et al.*, 2020).

Otra tecnología candidata para recuperar los desechos de calor residual en sistemas térmicos, es la turbina Tesla (Sheikhnejad *et al.*, 2020). La

turbina Tesla compuesta por un rotor con múltiples discos es una tecnología candidata para generar electricidad aprovechando fluidos viscosos y su energía de presión, por lo que los fluidos geotérmicos residuales de sistemas geotérmicos son una opción (Pfenniger *et al.*, 2014). Una ventaja significativa de la turbina Tesla sobre las máquinas térmicas es la temperatura de activación. A diferencia de las máquinas térmicas en donde la temperatura geotérmica juega un papel importante para su activación, en la segunda este parámetro no es tan crucial debido a que funciona según el principio de transmisión de par mediante esfuerzo cortante de la pared (Manfrida *et al.*, 2018). De esta forma, la turbina Tesla presenta una flexibilidad interesante de integrarse como tecnología complementaria en la recuperación de calor de sistemas geotérmicos y para maximizar el potencial de aprovechamiento de los recursos en la generación de electricidad (Ji *et al.*, 2019).

Por lo anterior, la recuperación de calor en sistemas geotérmicos mediante tecnologías de baja temperatura se ha vuelto un tema de interés para la comunidad científica. Entre las tecnologías más analizadas durante los últimos años se encuentran los ORC y los ARC. Por su parte, la turbina Tesla está en una etapa de adopción en el área de geotermia y puede ser una potencial candidata para generar electricidad mediante calor residual en el mediano plazo. Entre los análisis realizados por la comunidad científica para valorar la viabilidad de la integración de estas tecnologías en sistemas geotérmicos se destaca el análisis de energía, basado en la primera ley de la termodinámica. Por ejemplo, Braimakis *et al.* (2015), evaluaron un ORC activado con energía geotérmica. Al realizar ciertas variaciones en el fluido de trabajo del ORC, encontraron que la eficiencia del sistema puede variar entre el 15 y 40%. Ahmadi *et al.* (2020), caracterizaron un sistema geotérmico de generación de electricidad y refrigeración mediante un ORC y un ARC. En dicho estudio, los resultados se basaron en el análisis de energía y en la recuperación de calor del ORC para activar el ARC. Encontraron un aumento en la eficiencia energética del sistema del 9.3 al 47.3%. Liang *et al.* (2018), analizaron un ciclo

de refrigeración por absorción que emplea el par de trabajo amoníaco-agua. El estudio se centra en un análisis termodinámico de un sistema regenerativo geotérmico innovador. Se implementa un ORC y se analiza desde el punto de vista energético. Mediante el análisis encontraron que el sistema alcanza valores de 5 MW en la generación de electricidad y de 16.37% en la eficiencia, en condiciones óptimas de funcionamiento.

Jawad Al-Tameemi *et al.* (2019), evaluaron la incorporación de un ORC junto a una bomba de calor y un quemador de gas para producir electricidad, refrigeración y agua caliente para una calefacción central. Los resultados indicaron que este sistema puede mantener el rango de temperaturas ideal absorbiendo 12 kW de calor para elevar la temperatura del agua caliente a 80 °C. Roumpedakis *et al.* (2019), analizaron una integración entre un ORC con un ciclo de refrigeración para proporcionar energía, calefacción y frío simultáneamente. En la investigación evaluaron las eficiencias de la primera ley para una variedad de fluidos orgánicos en condiciones subcríticas y supercríticas en ciclos Rankine, y se optimizaron los sistemas considerando las diferencias mínimas de temperatura de los intercambiadores de calor. Se estimó que un enfriador basado en agua podría proporcionar una capacidad de refrigeración de 13 kW. Maryami y Dehghan (2017), compararon el rendimiento energético en sistemas de refrigeración por absorción. Demostraron que el sistema más eficiente en el manejo de bajas temperaturas es el de doble efecto, posicionándose sobre las diferentes configuraciones de ciclos refrigeración. Ji *et al.* (2019), analizaron el rendimiento de la recuperación de calor residual mediante una turbina Tesla. Los resultados indicaron que la potencia total y la eficiencia térmica global del sistema aumentaron en un rango de velocidad de rotación baja. Además, observaron que estos parámetros pueden mejorarse mediante la selección adecuada de la viscosidad del fluido de trabajo y el número de boquillas. Finalmente, Song *et al.* (2017), llevaron a cabo una investigación acerca del uso de turbinas Tesla en sistemas ORC de pequeña escala. Encontraron que, a una temperatura de evaporación de 350 K, el sistema ORC tiene la capacidad de producir una

potencia neta de salida de 1.27 kW, demostrando la viabilidad de las turbinas Tesla en aplicaciones de ORC.

Por otra parte, acorde con la información anterior, está demostrado que la recuperación de calor residual en sistemas geotérmicos de baja temperatura contribuye en la eficiencia y potencia de los sistemas geotérmicos. Sin embargo, al implementar la recuperación de calor, se incluyen tecnologías adicionales para el aprovechamiento del calor residual. Este incremento de tecnologías, incrementa también el costo de inversión inicial de los sistemas geotérmicos. Es por ello, que la comunidad científica ha investigado sobre la viabilidad económica de este tipo de sistemas. Los métodos implementados son una combinación entre la primera ley de la termodinámica y conceptos económicos. Mediante esta metodología se puede determinar la factibilidad económica de los sistemas geotérmicos de baja temperatura con recuperación de calor residual. Por ejemplo, Rubio-Maya *et al.* (2016), realizaron un análisis económico de un sistema geotérmico con recuperación de calor residual a un ORC de hasta 280 kW. El calor residual lo implementaron en la activación de un ARC de medio efecto y el calor residual restante en usos directos de calor. Para evaluar la factibilidad económica implementaron el Valor Actual Neto (VAN) y el Periodo de Recuperación de la Inversión Simple (PRS), y encontraron que el sistema geotérmico puede alcanzar una recuperación de la inversión inicial de 1.7 años.

En la misma dirección, Ambriz-Diaz *et al.* (2021), realizaron un análisis de factibilidad económica de la recuperación de calor residual geotérmico de baja temperatura a tres tecnologías diferentes de generación de electricidad. Entre las tecnologías de generación eléctrica, consideraron un ORC de 40 kW e implementaron un ARC para la producción de frío y un deshidratador para la recuperación de calor residual. En la factibilidad económica emplearon indicadores como el VAN y el PRS, encontrando que el sistema integrado con ORC puede alcanzar una recuperación de la inversión de 3.7 años. Astolfi *et al.* (2019), realizar el estudio económico de un ORC geotérmico de 1765 kW con novedosas unidades de rechazo de calor. Entre los indicadores

de evaluación de la factibilidad económica incluyeron el PRS y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Los resultados muestran un PRS de 3.74 años y una TIR de 28.2%. Cao y Ehyaei (2021), realizaron una evaluación económica de un sistema geotérmico con recuperación de calor en un ORC. La energía residual del ORC la emplearon en usos directos de calor como producción de agua potable e hidrógeno. Para la evaluación de la factibilidad económica utilizaron el PRS, y encontraron que el sistema geotérmico con recuperación de calor residual puede tener una recuperación de la inversión inicial en un periodo de 4.6 a 5.3 años. Li *et al.* (2021), realizaron una investigación sobre la factibilidad económica de un sistema geotérmico con recuperación de calor residual en un ORC de 580 kW. El calor residual se emplea para la producción de frío por un ARC y usos directos de energía térmica como lo es la calefacción. La factibilidad económica evaluada a través del PRS indica un periodo de recuperación de 3.07 años.

La revisión de literatura ha mostrado que existe una gran variedad de trabajos de sistemas geotérmicos con ORC en la generación de electricidad y que integran el ARC y los usos directos de calor, en la recuperación de calor residual. Sin embargo, no se han reportado trabajos en donde se indique la integración de la turbina Tesla en la recuperación de calor de sistemas geotérmicos de baja temperatura. De la misma manera, no se han encontrado investigaciones con un enfoque únicamente en la generación de electricidad a través de recursos geotérmicos de baja temperatura. Es necesario resaltar que los trabajos encontrados utilizan recursos geotérmicos con temperaturas superiores a los 100 °C. Lo anterior ha motivado a los autores a contribuir en llenar ese vacío existente en la literatura y en presentar por primera vez una propuesta teórica de un sistema geotérmico que se activa con una temperatura de 90 °C, y cuyo fin es solamente la generación de electricidad con un ORC y potenciar dicha generación de electricidad mediante la recuperación de calor residual con una turbina Tesla. Del mismo modo, se pretende mediante la propuesta, potenciar aún más la generación de electricidad del ORC utilizando un ARC de medio efecto activado con el calor re-

sidual, para reducir la temperatura de condensación ORC e incrementar su producción eléctrica. Por los hechos expuestos anteriormente, esta investigación tiene como objetivo principal realizar la evaluación energética y de factibilidad económica de la integración de un ciclo de refrigeración por absorción y una turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico de baja temperatura geotérmica, y para alcanzar el objetivo general, se plantean las siguientes actividades: 1) Realizar el análisis de energía de los componentes del sistema geotérmico implementado la primera ley de la termodinámica, para determinar las magnitudes de los flujos de energía de cada uno de los componentes e interacciones energéticas entre ellos. 2) Determinar en función de la primera ley de la termodinámica, la potencia de salida y la eficiencia energética del sistema geotérmico, así como las ventajas que conlleva la implementación de la integración propuesta para la recuperación de calor residual geotérmico de baja temperatura. 3) Estimar la probable factibilidad económica del sistema geotérmico, determinando costos de inversión, beneficios e indicadores de factibilidad económica, así como discutir posibles vías para llevar a la práctica el sistema propuesto.

## Descripción de la integración

### Sistema geotérmico total

El sistema propuesto es impulsado por un recurso geotérmico de baja temperatura para producir dos productos de electricidad, este sistema utiliza diferentes configuraciones termodinámicas, que se integran en diferentes niveles térmicos de temperatura en la misma planta geotérmica. El recurso geotérmico (agua líquida saturada) utilizado para la activación de la planta cuenta con una temperatura de 90 °C y un flujo másico de 10 kg/s (Ambriz-Díaz *et al.*, 2021). De acuerdo con la **Figura 1**, la planta de generación cuenta con dos ciclos termodinámicos y una turbina Tesla para su funcionamiento. El recurso geotérmico activa el ORC a una temperatura de 90 °C y cede 10 °C de su temperatura en el proceso de generación de electricidad en el ORC (Zhou *et al.*, 2022). El flujo geotérmico sigue el trayecto

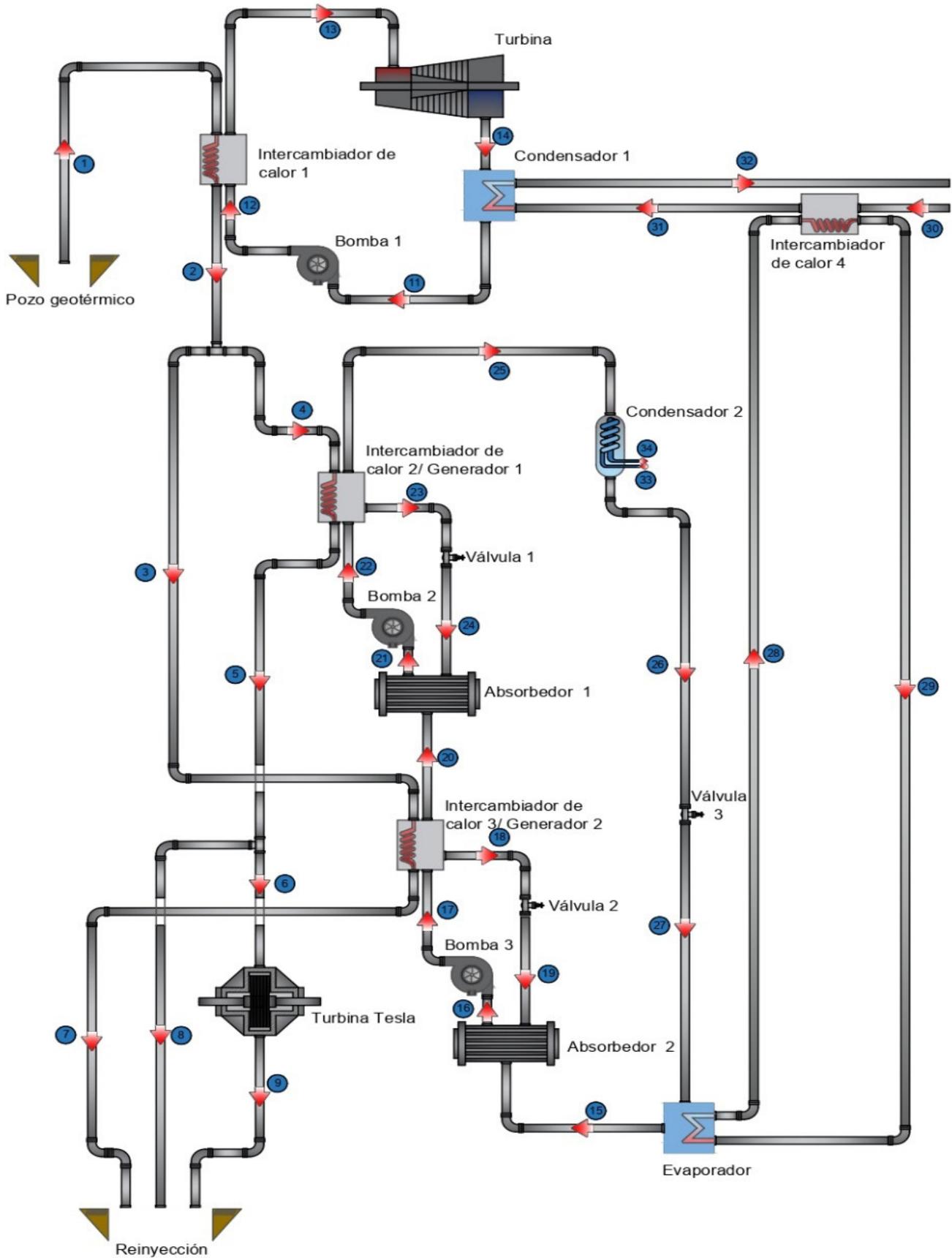


Figura 1. Diagrama general del sistema geotérmico.

ahora con 80 °C, el cual activa un ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto (ARC de medio efecto) (Alvi *et al.*, 2021). El frío generado por este ciclo de refrigeración se implementa para bajar la temperatura de condensación del ORC, y en consecuencia garantizar un funcionamiento más estable e incrementar su eficiencia y producción de potencia. Una fracción del fluido geotérmico (0.6 - 1.32 kg/s) con una temperatura de 70 °C activa una turbina Tesla mediante la que se genera electricidad en una segunda etapa (Ji *et al.*, 2019). Finalmente, todos los fluidos residuales son enviados a reinyección.

**Ciclo Rankine Orgánico.** El ORC integrado en el sistema geotérmico, es de configuración básica, con cuatro componentes: evaporador (intercambiador de calor 1), turbina, condensador y bomba (Rahbar *et al.*, 2017). El fluido orgánico implementado en el ORC es R134a (estados termodinámicos 11-14 de la **Figura 1**), el cual se encuentra en diferentes fases a lo largo del ciclo.

**Ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto.** El ciclo de refrigeración integrado en el sistema geotérmico es de configuración de medio efecto, con diez componentes: un evaporador, un condensador, dos absorbedores, tres válvulas, dos generadores y dos bombas (Srikhirin *et al.*, 2001). El par de trabajo del ARC de medio efecto es amoníaco-agua (NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O).

**Turbina Tesla.** La turbina Tesla integrada en el sistema geotérmico es una máquina de flujo de fluidos sin aspas que, a diferencia de las turbinas de aspas convencionales, convierte la energía de los fluidos en energía mecánica (Song *et al.*, 2017). La conversión tiene lugar en el rotor, que consta de múltiples discos. El fluido geotérmico entra en la turbina Tesla y cede de 5 grados de temperatura (Talluri *et al.*, 2020).

## Formulación del modelado energético

### Ecuaciones gobernantes

Los modelos termodinámicos se han establecido a partir de la primera ley de la termodinámica y de la

ecuación de conservación de la masa Ec. (1) y Ec. (2) y se han evaluado con el software Engineering Equation Solver (EES):

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum (\dot{m} \cdot h)_{\text{entrada}} - \sum (\dot{m} \cdot h)_{\text{salida}} \quad (1)$$

$$0 = \sum \dot{m}_{\text{entrada}} - \sum \dot{m}_{\text{salida}} \quad (2)$$

### Suposiciones generales para el modelado

A continuación, se presentarán todas las condiciones iniciales para ciclo de baja temperatura geotérmica (Eyerer *et al.*, 2020):

- La planta de energía geotérmica opera en una condición de estado estacionario.
- Las caídas de presión a lo largo de los intercambiadores de calor y tuberías se desprecian.
- Las turbinas y bombas operan de manera ideal.
- El fluido de aporte térmico se considera como agua caliente en estado de líquido incompresible.
- Los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes.

### Ciclo Rankine Orgánico

En la **Tabla 1**, se muestran las ecuaciones de balance y energía del ORC utilizado en el sistema geotérmico (Aliahmadi *et al.*, 2021).

### Ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto

La **Tabla 2**, resume la formulación del modelado termodinámico del ARC de medio efecto integrado en el sistema geotérmico (Srikhirin *et al.*, 2001).

### Turbina Tesla

El análisis de la turbina Tesla desde un punto de vista energético puede ser posible si la consideramos como un sistema global y tomando en cuenta los flujos de energía que entran y salen de dicho sistema. En este trabajo se han asumido las irreversibilidades termodinámicas durante el proceso de acuerdo con (Sengupta y Guha, 2016). La **Tabla 3**, resume la formulación del modelado termodinámico para la Turbina Tesla (Rusin *et al.*, 2021).

**Tabla 1.** Ecuaciones de masa y energía del ORC.

Componentes	Masa	Energía
Evaporador	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_R$ $\dot{m}_R = \frac{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2)}{h_{13} - h_{12}}$	$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_R \cdot h_{12} = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_R \cdot h_{13}$ $\dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2)$ $\dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_R \cdot (h_{13} - h_{12})$
Turbina	$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$	$\dot{W}_T = \dot{m}_{14} \cdot (h_{13} - h_{14})$
Condensador	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{11}$ $\dot{m}_{31} = \dot{m}_{32}$ $\dot{m}_{31} = \frac{\dot{m}_{14} \cdot (h_{14} - h_{11})}{h_{32} - h_{31}}$	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{14} \cdot (h_{14} - h_{11})$ $\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{31} \cdot (h_{32} - h_{31})$
Bomba	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$	$\dot{W}_B = \dot{m}_{11} \cdot (h_{12} - h_{11})$

**Tabla 2.** Ecuaciones de masa y energía del ARC de medio efecto.

Componentes	Masa	Energía
Generador 1	$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{25} + \dot{m}_{23}$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{Q}_{G1} + \dot{m}_{22} \cdot h_{22} = \dot{m}_{25} \cdot h_{25} + \dot{m}_{23} \cdot h_{23}$ $\dot{Q}_{G1} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5)$
Válvula 1	$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{24}$	-
Absorbedor 1	$\dot{m}_{20} + \dot{m}_{24} = \dot{m}_{21}$ $\dot{m}_{20} \cdot X_{20} + \dot{m}_{24} \cdot X_{24} = \dot{m}_{21} \cdot X_{21}$	$\dot{m}_{20} \cdot h_{20} + \dot{m}_{24} \cdot h_{24} = \dot{m}_{21} \cdot h_{21} + \dot{Q}_{A1}$
Bomba 2	$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22}$	$\dot{W}_{B2} + \dot{m}_{21} \cdot h_{21} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22}$
Condensador 2	$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{26}$	$\dot{Q}_{C2} + \dot{m}_{25} \cdot h_{25} = \dot{m}_{26} \cdot h_{26}$
Válvula 3	$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{27}$	-
Evaporador	$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{15}$ $\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} = \dot{m}_{27} \cdot h_{27} + \dot{Q}_E$ $\dot{Q}_E = \dot{m}_{29} \cdot (h_{29} - h_{28})$
Absorbedor 2	$\dot{m}_{15} + \dot{m}_{19} = \dot{m}_{16}$ $\dot{m}_{15} \cdot X_{15} + \dot{m}_{19} \cdot X_{19} = \dot{m}_{16} \cdot X_{16}$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} + \dot{m}_{19} \cdot h_{19} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} + \dot{Q}_{A2}$
Bomba 3	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$	$\dot{W}_{B3} + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} = \dot{m}_{17} \cdot h_{17}$
Generador 2	$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{20}$ $\dot{m}_3 = \dot{m}_7$	$\dot{Q}_{G2} + \dot{m}_{17} \cdot h_{17} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} + \dot{m}_{20} \cdot h_{20}$ $\dot{Q}_{G2} = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_7)$
Válvula 2	$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19}$	-

**Tabla 3.** Ecuaciones de masa y energía de la turbina Tesla.

Componente	Masa	Energía	Referencia
Turbina Tesla	$\dot{m}_6 = \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{Tesla} = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_9)$ $\dot{W}_{Tesla} = \eta \cdot \dot{Q}_{Tesla}$ $\eta = 0.56$	(Sengupta y Guha 2016)

**Componentes auxiliares**

En la **Tabla 4**, se presenta el análisis energético de los componentes auxiliares del sistema (Ceglia *et al.*, 2021). Básicamente, los componentes auxiliares del sistema geotérmico es el intercambiador de calor 4.

**Dimensionamiento del equipo**

Mediante el dimensionamiento del intercambiador de calor 4, se obtiene el área de transferencia de calor necesaria para la transferencia de calor entre el producto frigorífico del ARC y el agua de enfriamiento del ORC . El área de transferencia de calor se obtiene a partir del método de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (DMLT) mostrado en la **Tabla 5**.

**Sistema geotérmico total**

El desempeño energético del sistema geotérmico total depende de los productos de electricidad logrados por el ORC y la turbina Tesla. La Ec. (3) define la producción de potencia total del sistema geotérmico:

$$\dot{W}_{Tot} = \dot{W}_{ORC} + \dot{W}_{Tesla} \tag{3}$$

Otro parámetro importante para determinar la viabilidad energética del sistema geotérmico total es la eficiencia energética. De acuerdo con Parikhani

*et al.* (2021), la eficiencia por primera ley de un sistema geotérmico se puede obtener a partir de la Ec. (4):

$$\eta_{en} = \frac{\dot{W}_{Tot}}{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_0)} \tag{4}$$

**Modelo de factibilidad económica**

El modelo de factibilidad económica se establece en función de los costos de inversión de los componentes que integran el sistema geotérmico, los beneficios del sistema, e indicadores de factibilidad económica.

**Costos de inversión**

Los costos de inversión se determinan a partir de las capacidades nominales de los componentes. Para el ORC y la turbina Tesla el costo de inversión es función la potencia, mientras que para el ARC el costo de inversión depende de la capacidad frigorífica. En el caso del IC4, el costo es función de las dimensiones del intercambiador de calor (área de transferencia de calor), y finalmente, los costos de inversión de los pozos geotérmicos (pozo productor y pozo reinyector) son función de la profundidad. Por otra parte, para estimar los costos de inversión se han utilizado ecuaciones de costo encontradas en otras investigaciones (**Tabla 6**).

**Tabla 4.** Ecuaciones de masa y energía de los componentes auxiliares.

Componente	Masa	Energía
Intercambiador de calor 4 (IC4)	$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31}$ $\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}$	$\dot{m}_{30} \cdot h_{30} + \dot{m}_{28} \cdot h_{28} = \dot{m}_{31} \cdot h_{31} + \dot{m}_{29} \cdot h_{29}$ $\dot{Q}_{IC4} = \dot{m}_{30} \cdot (h_{30} - h_{31})$ $\dot{Q}_{IC4} = \dot{m}_{29} \cdot (h_{29} - h_{28})$

**Tabla 5.** Parámetros de transferencia de calor del intercambiador de calor 4.

Componente	DMLT	Área	Referencia
Intercambiador de calor 4	$DMLT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$ $\Delta T_1 = T_{31} - T_{28}$ $\Delta T_2 = T_{30} - T_{29}$	$A = \frac{\dot{Q}_{IC4}}{U \cdot DMLT}$ $U = 0.8 kW / m^2 \cdot K$	(Dimian y Bildea 2008)

**Tabla 6.** Ecuaciones para estimar los costos de inversión.

Componente	Ecuación	Referencia
Pozos geotérmicos	$C_{Pozo} = 2150 \cdot Z_{Pozo}$ $Z_{Pozo} = 200 m$	(Rubio-Maya <i>et al.</i> , 2016)
ORC	$C_{ORC} = 4541 \cdot \dot{W}_{ORC}$	(Lemmens 2016)
ARC	$C_{ARC} = 1424.5 \cdot \dot{Q}_E$	(Ambriz <i>et al.</i> , 2017)
Turbina Tesla	$C_{Tesla} = 5717 \cdot \dot{W}_{Tesla}$	(Gyroscope, 2024)
Intercambiador de calor 4	$C_{IC4} = 309.14 \cdot A_{IC4}^{0.85}$	(Ding <i>et al.</i> , 2021)

**Balance de beneficios económicos**

El balance de beneficios económicos, consiste en realizar un balance anual entre los beneficios y gastos del sistema. Los gastos anuales corresponden a la inversión total anualizada, esta inversión se calcula en función de una tasa de inversión y una vida útil de los componentes. Por otro lado, los beneficios se evalúan en función de los productos del sistema. En este caso, los productos corresponden a la electricidad que produce el sistema anualmente. La

electricidad total que genera el sistema geotérmico es función del tiempo de operación anual y del precio de venta de la electricidad. La **Tabla 7** resume las ecuaciones empleadas para el cálculo de los beneficios económicos del sistema.

**Indicadores de factibilidad**

Los indicadores de factibilidad permiten predecir la rentabilidad económica del sistema. Los indicadores que generalmente se implementan en sistemas

**Tabla 7.** Ecuaciones para el balance de beneficios económicos.

Concepto	Ecuación	Referencia
Costo de inversión anualizado	$C_{Anual} = C_{Total} \cdot \left[ \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$ $i = 15\%; n = 15 \text{ años}$	(Boyaghchi y Chavoshi 2017)
Beneficio de la electricidad anual	$I_e = \dot{W}_{ORC} \cdot t_{op} \cdot P_e$ $t_{op} = 7500 h$ $P_e = 0.13 USD/kWh$	(Teng <i>et al.</i> , 2021)
Balance económico anual	$BE = I_e - C_{Anual}$	(Maldonado <i>et al.</i> , 2024)

térmicos son el Valor Actual Neto y el Periodo de Recuperación Simple. Es preciso que VAN tenga un valor elevado y que el PRS sea un periodo corto de años para recuperar la inversión. La **Tabla 8**, muestra las ecuaciones de los indicadores de factibilidad.

## Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados y discusión de la evaluación energética y factibilidad económica. Con la finalidad de observar el desempeño del sistema geotérmico y de la influencia que tiene el ARC de medio efecto en el ORC, se presentan primeramente los resultados para el ORC operando sin el sistema de refrigeración y posteriormente se presenta el desempeño que puede lograr el ORC cuando opera de manera en conjunto con el ARC. También se muestran los resultados energéticos y económicos para el sistema geotérmico total, mismo que integran los ciclos ORC, ARC de medio efecto y turbina Tesla.

### Propiedades termofísicas

La **Tabla 9**, muestra las propiedades termofísicas del sistema geotérmico. Estas propiedades se han obtenido implementando las condiciones iniciales de operación del sistema en el software EES. También, para la obtención de algunas de estas propiedades ha sido necesario implementar los balances de masa y energía.

### Resultados del ciclo Rankine orgánico

Los resultados obtenidos para el ORC se muestran en la **Figura 2**. El sistema propuesto ORC puede alcanzar una producción de potencia de 46.9 kW en la turbina. Sin embargo, la bomba consume 4.1 kW, por lo que la producción de potencia

neto del ciclo es de 42.8 kW. Para alcanzar este producto, el ORC requiere de 419.9 kW de carácter térmicos, y en este caso corresponde al aporte de calor geotérmico en el evaporador. Sin embargo, para lograr el funcionamiento en configuración de máquina térmica el ORC requiere disipar 377.1 kW a la atmósfera.

Una variante que puede afectar la producción de potencia es la temperatura de activación del evaporador del ORC, por lo que, a menor temperatura, los flujos de energía se observan en menor magnitud. Sin embargo, al incrementar la temperatura de activación del ORC, la viabilidad energética del ciclo se observa favorecida, como se muestra en la **Figura 3**.

### Resultados del ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto

Los resultados obtenidos para el ARC de medio efecto se muestran en la **Figura 4**. Se puede destacar que el calor consumido de los generadores es diferente ya que en el generador 2 tiene 8 veces más flujo geotérmico que el generador 1. La potencia consumida por las bombas es casi despreciable a excepción de la bomba 3 que es la bomba de baja presión la cual consume 10 veces más que la bomba 2 de alta presión. Como en el generador 2 se tiene 8 veces más de calor así mismo se disipa 5 veces más calor a la atmósfera en el absorbedor 2, junto con el condensador disipan un total de 454.67 kW de para producir 34.59 kW frigoríficos.

### Resultados de la turbina Tesla

Los resultados obtenidos para la turbina Tesla muestran una adecuada viabilidad energética al integrarse en el sistema geotérmico. Para el sistema propuesto, la turbina Tesla puede alcanzar una pro-

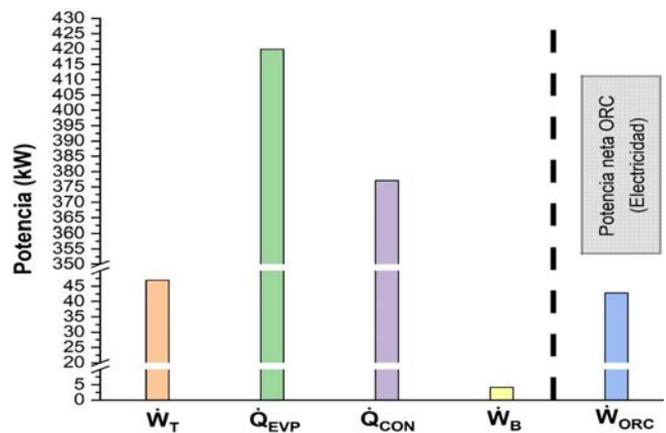
**Tabla 8.** Indicadores de factibilidad económica.

Indicador	Ecuación	Referencia
Valor Actual Neto	$VAN = \left( \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right) BE - C_{Total}$	(Maldonado <i>et al.</i> , 2024)
Periodo de recuperación	$PRS = \frac{C_{Total}}{BE}$	(Shaghghi <i>et al.</i> , 2024)

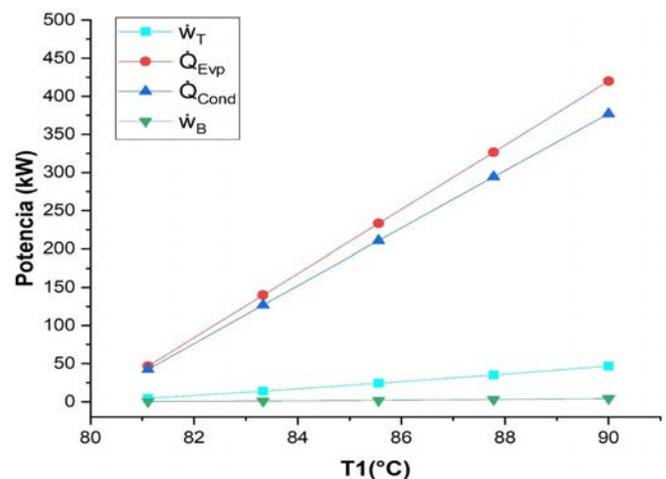
**Tabla 9.** Propiedades termo físicas del sistema geotérmico.

Estado	Fluido	$T$ (°C)	$P$ (kPa)	$h$ (kJ/kg)	$\dot{m}$ (kg/s)
1	Geotérmico	90	800	376.9	10
2	Geotérmico	80	800	334.9	10
3	Geotérmico	80	800	334.9	8.47
4	Geotérmico	80	800	334.9	1.52
5	Geotérmico	70	800	293	1.52
6	Geotérmico	70	800	293	1
7	Geotérmico	70	800	293	8.47
8	Geotérmico	70	800	293	0.52
9	Geotérmico	66	-	276.3	1
11	R134a	40	1,017	108.3	2.47
12	R134a	35.5	2,928	109.9	2.47
13	R134a	85	2,928	279.5	2.47
14	R134a	21.3	1,017	260.6	2.47
15	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	2	180	1262	0.03
16	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	34.9	180	-58.91	1.75
17	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	35.0	600	-58.91	1.75
18	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	74.9	600	120.2	1.72
19	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	46.5	180	120.2	1.72
20	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	74.9	600	1484	0.03
21	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	34.9	600	-74.84	0.13
22	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	35.0	1,100	-74.21	0.13
23	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	74.9	1,100	99.06	0.10
24	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	57.9	600	99.06	0.10
25	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	74.9	600	1452	0.03
26	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	28.3	1,100	126.4	0.03
27	NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	-20.9	180	126.4	0.03
28	H <sub>2</sub> O	-10	1200	-345.1	0.08
29	H <sub>2</sub> O	15	1200	62.92	0.08
30	H <sub>2</sub> O	25	100	104.8	9.01
31	H <sub>2</sub> O	24.08	100	100.9	9.01
32	H <sub>2</sub> O	35	100	146.6	9.01

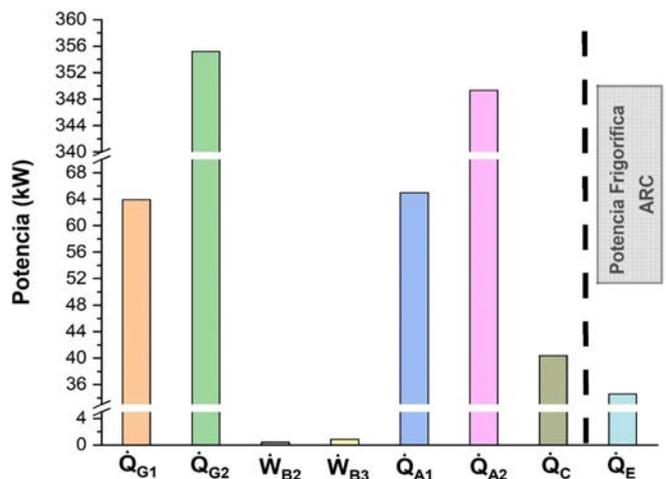
ducción de potencia de entre 7 – 13 kW (**Figuras 5 y 6**). Para alcanzar dicha producción de potencia se tienen ciertos parámetros fundamentales, uno de



**Figura 2.** Flujos de energía de los componentes del ORC.



**Figura 3.** Influencia de la temperatura del fluido geotérmico en el ORC.



**Figura 4.** Flujos de energía en el ARC de medio efecto.

ellos es el flujo másico geotérmico, ligado estrechamente a la cantidad de energía que activa la turbina Tesla. Otro parámetro importante, es la eficiencia de la

turbina Tesla, la cual está estrechamente enlazada a las irreversibilidades termodinámica de la misma. Otra particularidad que se ha obtenido de la turbina Tesla integrada en el sistema geotérmico es el comportamiento energético, a medida que se incrementa el flujo másico y la eficiencia, la potencia de la turbina Tesla se observa incrementada.

**Resultados para los sistemas auxiliares**

El intercambiador de calor 4, tiene la función de disminuir la temperatura del agua de enfriamiento del ORC. Para ello, este intercambiador requiere interactuar 34.59 kW frigoríficos entre el agua fría producida por el ARC y el agua de enfriamiento del ORC. En la misma dirección, para la interacción de la capacidad frigorífica del ARC y el agua de enfriamiento del ORC, se requiere un área de transferencia de calor del intercambiador de calor 4 de 2.2 m<sup>2</sup>. Por otra parte, en condiciones normales, sin implementar el ARC para disminuir la temperatura del agua de enfriamiento del ORC, el ORC es refrigerado por un recurso de agua de enfriamiento de 25 °C. En estas condiciones, la temperatura del R134a a la salida del condensador alcanza 40 °C. Sin embargo, al implementar el ARC para disminuir la temperatura de enfriamiento del ORC, se logra una temperatura de condensación de 39 °C. Lo que indica que, mediante la configuración geotérmica propuesta en este trabajo, el ARC apoyado del intercambiador de calor 4, logra disminuir la temperatura de enfriamiento del ORC en 1 °C. Cabe mencionar que el ARC disminuye solamente un 1 °C la temperatura del agua de enfriamiento debido a que el flujo de agua de enfriamiento del ORC es 109.8 veces más grande que el flujo de agua fría producida por el ARC. Sin embargo, este grado centígrado disminuido en la temperatura de enfriamiento del ORC, repercute positivamente en su eficiencia y potencia producida. Por otra parte, si se pretendiera reducir la temperatura del agua de enfriamiento del ORC en 10 °C, se tendría que incrementar la capacidad de enfriamiento del ARC en al menos 10 veces más, lo que conllevaría a incrementar el calor de aporte geotérmico hasta al menos 4,000 kW térmicos (Tabla 10).

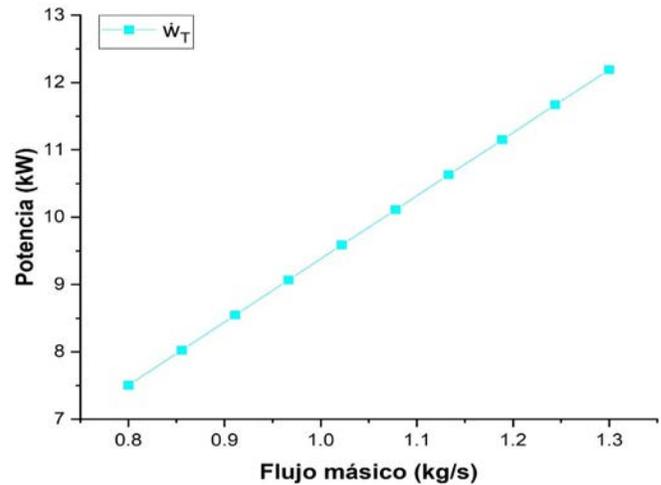


Figura 5. Potencia de la turbina Tesla en función del flujo másico.

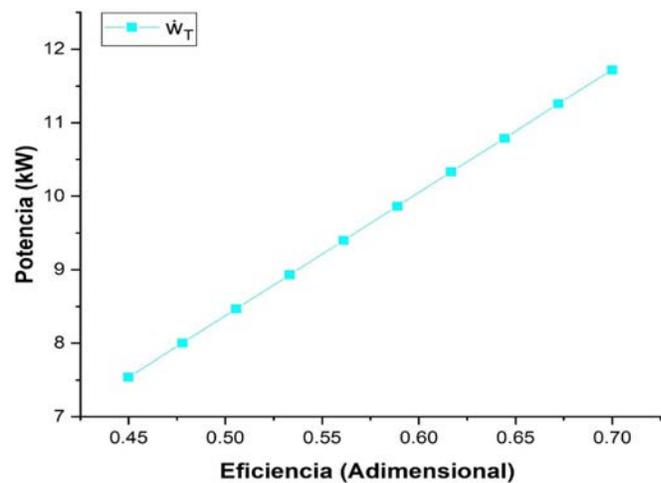


Figura 6. Potencia de la turbina Tesla en función de la eficiencia.

Tabla 10. Variación de parámetros en función de la capacidad de enfriamiento en el intercambiador de calor 4.

(kW)	(kW)	(kg/s)		(°C)	(°C)
35	425	0.083	9.014	25	24.07
75.56	917.5	0.181	9.014	25	23
116.1	1410	0.278	9.014	25	21.92
156.7	1902	0.375	9.014	25	20.85
197.2	2395	0.472	9.014	25	19.77
237.8	2887	0.570	9.014	25	18.69
278.3	3380	0.667	9.014	25	17.62
318.9	3872	0.764	9.014	25	16.54
359.4	4365	0.861	9.014	25	15.47
400	4857	0.959	9.014	25	14.39

## Resultados del sistema geotérmico total

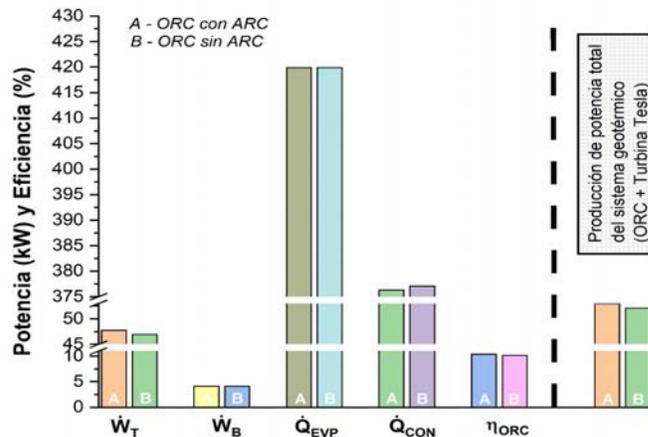
### Resultados energéticos

La **Figura 7**, muestra el desempeño energético del sistema geotérmico total. El sistema tiene la capacidad de producir dos productos de electricidad, uno en el ORC y otro en la turbina Tesla. Sin embargo, el producto de electricidad del ORC puede ser influenciado de manera positiva por el ARC de medio efecto, lo que conlleva a una mayor producción de potencia del sistema geotérmico total. De esta forma en la **Figura 7**, se puede apreciar que el ORC apoyado con el ARC para su enfriamiento logra un 1.80% superior en la producción de potencia que el ORC sin el ARC como apoyo. Del mismo modo la eficiencia del ORC con ARC se observa incrementada en un 1.92%. Por otra parte, el sistema geotérmico total con ORC tiene una producción de potencia mayor en un 0.85% que el sistema geotérmico sin ORC. Finalmente, la eficiencia energética de la planta, alcanza una magnitud de 19.46% con ARC y un 19.14% sin ARC.

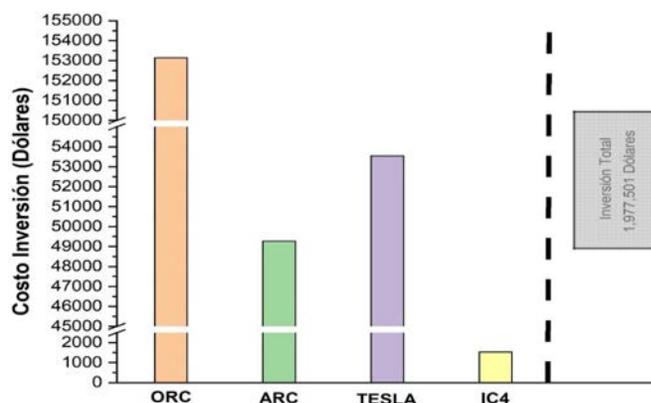
### Resultados de factibilidad económica

Los resultados del análisis de factibilidad económica muestran que el sistema geotérmico integrado con el ORC, el ARC y la turbina Tesla no es económicamente factible. Por lo que su ventaja de aplicación y llevar a la práctica solamente se justifica por la parte energética y por el uso de una energía limpia como lo es la energía geotérmica. La factibilidad económica desfavorable es debida a los altos costos de inversión de los componentes que integran el sistema. Los costos de inversión total ascienden a 1,977,501 dólares americanos, y esta inversión inicial al anualizarla (338,187 dólares) supera por mucho (en 6.65 veces) los beneficios anuales derivados por la venta de electricidad (50,866 dólares). Lo anterior, resulta en un balance de beneficios desfavorable, lo que deriva en indicadores económicos negativos.

El mayor costo de inversión se deriva de la perforación de los pozos geotérmicos (pozo productor y pozo reinector), esta inversión representa el 86.97% de la inversión total, en otras palabras, los



**Figura 7.** Desempeño del sistema geotérmico total.



**Figura 8.** Costos de inversión del sistema geotérmico.

costos de perforación son superiores en 7.6 veces, respecto del costo de todos los componentes del sistema (ORC + ARC + turbina Tesla + IC4). La **Figura 8** muestra los costos de inversión de los componentes del sistema geotérmico, a excepción del costo de los pozos geotérmicos que ascienden a la cantidad de 1,720,000 Dólares. Entre los componentes del sistema geotérmico, el ORC representa el costo mayor, seguido por la turbina Tesla y finalmente el ARC e IC4. Cabe resaltar que el ORC alcanza un mayor costo debido a que es el componente con mayor capacidad nominal. Sin embargo, al realizar una comparativa con la turbina Tesla, la turbina Tesla resulta 25% más costosa de forma unitaria (dólares/kW) que el ciclo ORC.

## Discusión

El sistema geotérmico con recuperación de calor residual de baja temperatura presenta ventajas desde

el punto de vista energético. Estas ventajas son claramente notorias en cuanto a la producción de electricidad y eficiencia energética. También estas ventajas pueden presentarse desde el punto de vista ambiental ya que, si se compara la generación de electricidad del sistema geotérmico con una central de combustible fósil, el sistema geotérmico puede evitar una magnitud considerable de emisiones de CO<sub>2</sub>. Una central de combustible fósil puede alcanzar 733 gCO<sub>2</sub>/kWh (Peyvandi *et al.*, 2023), por lo que el sistema geotérmico con recuperación de calor residual con una producción de potencia de 52.94 kW y operando con energía limpia, 7,500 horas por año, estarían evitando 291.03 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> por año a la atmósfera. También, es necesario resaltar que, mediante la propuesta, también se pueden estar abriendo nuevas brechas para la implementación de tecnologías que aún no son ampliamente utilizadas en geotermia.

Por otra parte, aunque la eficiencia y la potencia del sistema crecen con la recuperación de calor residual, el sistema no ha resultado económicamente factible. Esta factibilidad desfavorable se atribuye al elevado costo de la inversión inicial. De esta inversión inicial, la parte medular que vuelve desfavorable la factibilidad económica, es la inversión derivada de los costos de preformación de los pozos geotérmicos y de las bajas capacidades nominales de producción de electricidad de las tecnologías, por lo que el sistema podría convertirse en factible incrementando la potencia eléctrica de salida del sistema geotérmico. Sin embargo, el incremento de dicha potencia, depende de las características termodinámicas del recurso geotérmico disponible. Li *et al.* (2021), indican que la rentabilidad económica de un sistema geotérmico de estas características puede ser económicamente viable a partir de una temperatura del recurso geotérmico de 100 °C. No obstante, para la propuesta de este trabajo no sería una opción debido a que, si se contara con una temperatura del recurso geotérmico de 100 °C, se podría proponer un ARC de simple efecto, ya que alcanza un mayor desempeño termodinámico que el ARC de medio efecto. Lo anterior representaría un desvío del objetivo de la integración propuesta en este trabajo.

Otra forma de obtener una factibilidad económica favorable, es implementar los denominados usos directos, que tienen grandes beneficios en la factibilidad económica. Esto se puede confirmar de acuerdo con la revisión de antecedentes. Sin embargo, el objetivo principal de esta investigación es proponer un sistema con fines solamente de generación de electricidad. Por lo que, finalmente, se puede resaltar que la implementación práctica de esta propuesta dependería de dos factores. El primer factor para la implementación práctica sería que los pozos geotérmicos fueran donados de algún campo geotérmico abandonado y el segundo factor sería que el proyecto fuera financiado. Se puede resaltar que al llevar a la práctica este tipo de sistemas activados con recursos de muy baja temperatura, se podría estar dando un paso más hacia un futuro sustentable.

## Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la evaluación energética y económica de la integración de un ARC de medio efecto y una turbina Tesla en la recuperación de calor residual de un ciclo Rankine orgánico activado con energía geotérmica de baja temperatura. Se puede resaltar que la integración de las tres tecnologías presenta un incremento en la producción de potencia global del sistema geotérmico. Por una parte, si el sistema contemplará solamente el ORC y no se integrará la turbina Tesla en la recuperación de calor, el sistema geotérmico solamente tendría la capacidad de producir una potencia de 42.8 kW. Sin embargo, al integrar la Turbina Tesla en la recuperación de calor residual se logra una producción de potencia adicional de 9.3 kW. Por otra parte, al integrar el ORC, la turbina Tesla y el ARC de medio efecto, el sistema puede aun incrementar en mayor medida la producción de potencia total. Incluyendo el ARC de medio efecto como apoyo de refrigeración del ORC, el sistema puede alcanzar una producción de potencia total de 52.9 kW y lograr un desempeño general de la utilización de la energía de 20.31%. En la misma dirección, la mejora de la factibilidad económica podría encontrarse en la utilización de campos geotérmicos con pozos perforados

en estado inactivo que pudieran ser donados y con el apoyo a proyectos por tratarse de energías limpias. Lo anterior, podría hacer atractiva la exploración eficiente de los recursos geotérmicos de baja temperatura y contribuir en la generación de electricidad de pequeña escala.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación del Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM) – Proyecto: 19424.24-P. Los autores agradecen el apoyo para la realización de esta investigación.

## Referencias

Aghahosseini A, Breyer C (2020). From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential. *Applied Energy* 279:115769. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115769

Ahmadi A, El Haj Assad M, Jamali DH, Kumar R, Li ZX, Salameh T, Al-Shabi M, and Ehyaei MA (2020). Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production* 274:122950. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122950

Aliahmadi M, Moosavi A, and Sadrhosseini H (2021). Multi-objective optimization of regenerative ORC system integrated with thermoelectric generators for low-temperature waste heat recovery. *Energy Reports* 7:300–313. doi:10.1016/j.egy.2020.12.035

Alimonti C, Conti P, and Soldo E (2021). Producing geothermal energy with a deep borehole heat exchanger: Exergy optimization of different applications and preliminary design criteria. *Energy* 220:119679. doi:10.1016/j.egy.2020.119679

Alvi JZ, Feng Y, Wang Q, Imran M, and Pei G (2021). Effect of working fluids on the performance of phase change material storage based direct vapor generation solar organic Rankine cycle system. *Energy Reports* 7:348–361. doi:10.1016/j.egy.2020.12.040

Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Chávez O, Ruiz-Casanova E, and Pastor-Martínez E (2021). Thermodynamic performance and economic feasibility of Kalina, Goswami and Organic Rankine Cycles coupled to a polygeneration plant using geothermal energy of low-grade temperature: *Energy Conversion and Management* 243:114362. doi:10.1016/j.enconman.2021.114362

Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Pacheco Ibarra JJ, Galván SR, and Patiño J (2017). Analysis of a sequential production of electricity, ice and drying of agricultural products by cascading geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(28):18092–18102. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.02.154

Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Ruiz-Casanova E, Martínez-Patiño J, and Pastor-Martínez E (2020). Advanced exergy and exergoeconomic analysis for a polygeneration plant operating in geothermal cascade. *Energy Conversion and Management* 203:112227. doi:10.1016/j.enconman.2019.112227

Astolfi M, La Diega LN, Romano MC, Merlo U, Filippini S, and Macchi E (2020). Techno-economic optimization of a geothermal ORC with novel “Emeritus” heat rejection units in hot climates. *Renewable Energy* 147:2810–2821. doi:10.1016/j.renene.2019.01.065

Boyaghchi FA, Chavoshi, M (2017). Multi-criteria optimization of a micro solar-geothermal CCHP system applying water/CuO nanofluid based on exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental concepts. *Applied Thermal Engineering* 112:660–675. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.10.139

Braimakis K, Preißinger M, Brüggemann D, Karellas S, and Panopoulos K (2015). Low grade waste heat recovery with subcritical and supercritical Organic Rankine Cycle based on natural refrigerants and their binary mixtures. *Energy* 88:80–92. doi:10.1016/j.energy.2015.03.092

Ceglia F, Marrasso E, Roselli C, Sasso M (2021). Effect of layout and working fluid on heat transfer of polymeric shell and tube heat exchangers for small size geothermal ORC via 1-D numerical analysis. *Geothermics* 95:102118. doi:10.1016/j.geothermics.2021.102118

Cao Y, Ehyaei MA (2021). Energy, exergy, exergoenvironmental, and economic assessments of the multigeneration system powered by geothermal energy. *Journal of Cleaner Production* 313:127823. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127823

Eyerer S, Dawo F, Wieland C, Spliethoff H (2020). Advanced ORC architecture for geothermal combined heat and power generation. *Energy* 205:117967. doi:10.1016/j.energy.2020.117967

Dimian AC, Bildea CS (2008). Appendix B: Heat-Exchanger Design. In *Chemical Process Design* (pp. 474–482). Wiley. doi:10.1002/9783527621583.app2

Ding P, Zhang K, Yuan Z, Wang Z, Li D, Chen T, Shang J, Shofahaei R (2021). Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of geothermal-based electricity and cooling system using zeotropic mixtures as the working fluid. *Journal of Cleaner Production* 294:126237. doi:10.1016/j.

jclepro.2021.126237

Gong Y, Yang L, Lu Z, Wang L, Li H (2021). Thermodynamic performance assessment of ammonia/ionic liquid based half-effect absorption refrigeration cycle. *Case Studies in Thermal Engineering* 25:100924. doi:10.1016/j.csite.2021.100924

Gyroscope (2024). Tesla turbine. <https://www.gyroscope.com/d.asp?product=Teslaturbine4>

Jawad Al-Tameemi MR, Liang Y, Yu Z (2019). Combined ORC-HP thermodynamic cycles for DC cooling and waste heat recovery for central heating. *Energy Procedia* 158:2046–2051. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.471

Ji F, Bao Y, Zhou Y, Du F, Zhu H, Zhao S, Li G, Zhu X, Ding S (2019). Investigation on performance and implementation of Tesla turbine in engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management* 179:326–338. doi:10.1016/j.enconman.2018.10.071

Lemmens S (2016). Cost engineering techniques & their applicability for cost estimation of organic rankine cycle systems. *Energies* 9(7):485. doi:10.3390/en9070485

Li T, Liu Q, Xu Y, Dong Z, Meng N, Jia Y, Qin, H (2021). Techno-economic performance of multi-generation energy system driven by associated mixture of oil and geothermal water for oilfield in high water cut. *Geothermics* 89:101991. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101991

Liang Y, Shu G, Tian H, Sun Z (2018). Investigation of a cascade waste heat recovery system based on coupling of steam Rankine cycle and NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management* 166:697–703. doi:10.1016/j.enconman.2018.04.064

Loreti G, Facci AL, Baffo I, Ubertini S (2019). Combined heat, cooling, and power systems based on half effect absorption chillers and polymer electrolyte membrane fuel cells. *Applied Energy* 235:747–760. doi:10.1016/j.apenergy.2018.10.109

Maldonado M, Belem A, Villalobos P, Felipe L, Fierro R, Ricardo J, Durán L, Manuel L, Chávez J, Alexandra J, Víctor A-D. (2024). Thermodynamic and economic analysis of a geothermal trigeneration energy system, integrated with the flash, Kalina and Stirling cycles. *Ciencia Nicolaita* 90:57-71. doi:10.35830/cn.vi90.725

Manfrida G, Pacini L, Talluri L (2018). An upgraded Tesla turbine concept for ORC applications. *Energy* 158:33–40. doi:10.1016/j.energy.2018.05.181

Maragna C, Altamirano A, Tréméac B, Fabre F, Rouzic L, Barcellini P (2024). Design and optimization of a geothermal absorption cooling system in a tropical climate. *Applied*

*Energy* 364:123102. doi:10.1016/j.apenergy.2024.123102

Maryami R, Dehghan AA (2017). An exergy based comparative study between LiBr/water absorption refrigeration systems from half effect to triple effect. *Applied Thermal Engineering* 124:103–123. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.05.174

Parikhani T, Delpisheh M, Haghghi MA, Holagh SG, Athari H (2021). Performance enhancement and multi-objective optimization of a double-flash binary geothermal power plant. *Energy Nexus* 2:100012. doi:10.1016/j.nexus.2021.100012

Peyvadi M, Hajinezhad A, Moosavian S (2023). Investigating the intensity of GHG emissions from electricity production in Iran using renewable sources. *Results in Engineering*, 100819. doi:10.1016/j.rineng.2022.100819

Pfenniger A, Vogel R, Koch VM, Jonsson M (2014). Performance Analysis of a Miniature Turbine Generator for Intracorporeal Energy Harvesting. *Artificial Organs* 38(5):E68-E81. doi:10.1111/aor.12279

Rahbar K, Mahmoud S, Al-Dadah RK, Moazami N, Mirhadizadeh SA (2017). Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. *Energy Conversion and Management* 134:135–155. doi:10.1016/j.enconman.2016.12.023

Roumpedakis TC, Christou T, Monokrousou E, Braimakis K, Karellas S (2019). Integrated ORC-Adsorption cycle: A first and second law analysis of potential configurations. *Energy* 179:46–58. doi:10.1016/j.energy.2019.04.069

Rubio-Maya C, Pastor E, Romero CE, Ambriz VM, Pacheco-Ibarra JJ (2016). Techno-economic assessment for the integration into a multi-product plant based on cascade utilization of geothermal energy. *Applied Thermal Engineering* 108:84–92. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.108

Rusin K, Wróblewski W, Rulik S (2021). Efficiency based optimization of a Tesla turbine. *Energy* 236:121448. doi:10.1016/j.energy.2021.121448

Sengupta S, Guha A (2016). Flow of a nanofluid in the microspacing within co-rotating discs of a Tesla turbine. *Applied Mathematical Modelling* 40(1):485–499. doi:10.1016/j.apm.2015.05.012

Shaghghi A, Honarvar F, Jafari M, Solati A, Zahedi R, Taghitahoone M (2024). Thermodynamic and thermoeconomic evaluation of integrated hybrid solar and geothermal power generation cycle. *Energy Conversion and Management: X* 23:100685. doi:10.1016/j.ecmx.2024.100685

Sheikhnejad Y, Simões J, Martins N (2020). Introducing Tesla turbine to enhance energy efficiency of refrigeration cycle. *Energy Reports* 6:358–363. doi:10.1016/j.egypr.2019.08.073

Song J, Gu C wei, Li X song (2017). Performance estimation of Tesla turbine applied in small scale Organic Rankine Cycle (ORC) system. *Applied Thermal Engineering* 110:318–326. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.168

Srikhirin P, Aphornratana S, Chungpaibulpatana S (2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5(4):343-372.

Talluri L, Dumont O, Manfrida G, Lemort V, Fiaschi D (2020). Experimental investigation of an Organic Rankine Cycle Tesla turbine working with R1233zd(E). *Applied Thermal Engineering* 174:115293. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115293

applthermaleng.2020.115293

Teng S, Wang M, Xi H, Wen S (2021). Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different ORC based CHP systems for waste heat recovery. *Case Studies in Thermal Engineering* 28:101444. doi:10.1016/j.csite.2021.101444

Zhou Y, Ruan J, Hong G, Miao, Z (2022). Dynamic Modeling and Comparison Study of Control Strategies of a Small-Scale Organic Rankine Cycle. *Energies* 15(15):5505. doi:10.3390/en15155505

## Nomenclatura

### Símbolos

$A$	Área de transferencia de calor ( $m^2$ )
$BE$	Beneficio anual (Dólares americanos)
$C$	Costo de inversión (Dólares americanos)
$DMLT$	Diferencia media logarítmica de temperaturas ( $^{\circ}C$ )
$h$	Entalpía ( $kJ\ kg^{-1}$ )
$i$	Tasa de interés (%)
$I_e$	Ingreso por venta de electricidad (Dólares americanos)
$\dot{m}$	Flujo másico ( $kg\ s^{-1}$ )
$P$	Presión (kPa)
$P_e$	Precio de venta de electricidad (Dólares americanos $kWh^{-1}$ )
$PRS$	Periodo de recuperación simple (años)
$\dot{Q}$	Potencia calorífica (kW)
$T$	Temperatura ( $^{\circ}C, K$ )
$t_{op}$	Tiempo de operación (h)
$U$	Coefficiente global de transferencia de calor ( $kW\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$ )

$VAN$	Valor actual neto (Dólares americanos)
$\dot{W}$	Potencia (kW)
$X$	Fracción de masa (-)
$Z$	Profundidad de pozo geotérmico (m)

### Letras griegas

$\eta$	Eficiencia (%)
--------	----------------

### Subíndices

0	Estado de referencia
1...27	Estados termodinámicos
A1, A2	Absorbedor 1 y 2
B, B2 y B3	Bombas
Cond	Condensador
en	Energía
Evap, E	Evaporador
G1, G2	Generador 1 y 2
IC4	Intercambiador de calor 4
T	Turbina
R	Refrigerante (R134a)



# Una revisión sobre las posibilidades de autosuficiencia energética y reutilización de agua en las plantas de tratamiento de agua residual en México

## A review of the possibilities of energy self-sufficiency and water reuse in wastewater treatment plants in Mexico

Carmen Cecilia García Castillo<sup>\*1,2</sup>, Hilda R. Guerrero García Rojas<sup>2</sup>, Erandi Maldonado Villalpando<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, Tecnológico Nacional de México

<sup>2</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Economía

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM-Campus Morelia

### Historial

Manuscrito recibido: 1 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Carmen Cecilia García Castillo

e-mail: carmen.gc@vmorelia.tecnm.mx

ORCID: 0000-0002-0260-2051

### Resumen

Las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) municipales en México enfrentarán grandes desafíos en los próximos años, entre ellos la autosuficiencia energética y la reutilización del agua tratada. El objetivo del presente trabajo es presentar una base contextual de la situación de las PTAR y sus posibilidades futuras para transitar a una operación basada en la economía circular. Se encontró que la autosuficiencia energética puede implementarse en el 5.8% de las PTAR del país y que la reutilización del agua tratada en riego e infiltración es apenas cercana al 10%. Estas cifras evidencian la necesidad de generar políticas públicas y marcos regulatorios que propicien sistemas de tratamiento de agua residual sustentables.

**Palabras clave:** Economía circular, lodos residuales, sustentabilidad hídrica, agua

### Introducción

El presente trabajo plantea una visión actual de las posibilidades que tienen las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) en México respecto a la autosuficiencia energética y reutilización del agua tratada. Esta intención se deriva de la problemática económica, ambiental y técnica que mantienen dichas instalaciones. Lo anterior las ha convertido en una carga insostenible para los municipios por los costos de operación y mantenimiento que representan, así como también por el impacto ambiental de los subproductos que generan, como

### Abstract

Municipal Wastewater Treatment Plants (WWTP) will face great challenges in the coming years, such as reaching energy self-sufficiency and the reuse of treated water. Therefore, the purpose of this project is to present a contextual basis of the situation of WWTPs and their future possibilities to migrate to a circular economy-based operation. It was found that energy self-sufficiency can be implemented in 5.8% of the country's WWTPs and that the reuse of treated water in irrigation and infiltration is barely close to 10%. These numbers underscore the need for public policies and regulatory schemes that promote sustainable wastewater treatment systems.

**Keywords:** Circular economy, sewage sludge, water sustainability, water

los residuos sólidos urbanos y los lodos residuales contaminados.

Según la Ley de Aguas Nacionales (2023, p. 2), las aguas residuales se definen como “*las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público, urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas*”. Cuando estas aguas son vertidas sin tratamiento a los cuerpos de agua, generan impactos negativos, entre ellos, la eutrofización y en el peor de los casos, la extinción

de los cuerpos de agua, con el consecuente desequilibrio del ciclo hídrico; también causan problemas de salud en la población cuando se tiene contacto directo con ellas (Mihelcic y Zimmerman, 2011).

En México, los encargados del tratamiento y disposición de las aguas residuales son los Organismos Operadores de Agua o ente similar en los municipios, mismos que, a partir de la descentralización de la gestión del agua en 1980 y con la reforma al artículo 115 Constitucional, se les otorgó toda la responsabilidad de la gestión del agua, desde el servicio de agua potable, drenaje y alcantarillado, hasta el tratamiento y disposición de sus aguas residuales. Lamentablemente, desde entonces y hasta ahora se les ha dejado solos con esa enorme tarea, sin guías claras ni recursos suficientes para cumplir con dicha obligación (Castañeda Villanueva, 2020; Silva, 2015).

En relación a la pertinencia de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), viene al caso mencionar un estudio dirigido por Lahera-Ramón (2010) sobre la infraestructura sustentable en plantas de tratamiento de aguas residuales, en el cual se determina que existe una excesiva mecanización y automatización de los procesos en las depuradoras, complicando su operación y mantenimiento, además de tratarse de procesos con alto consumo energético y con insumos fuera del alcance de muchos municipios, con la subsecuente generación de contaminantes al aire y lodos residuales.

En lo que respecta a los lodos generados en el tratamiento del agua residual, éstos pueden generar contaminación atmosférica, contaminación del suelo y de las aguas nacionales, afectando al ecosistema donde se depositen; por lo que, como se establece en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, los lodos deben ser estabilizados con la finalidad de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger la salud humana y el ambiente (SEMARNAT, 2003).

La estabilización anaerobia es una de las alternativas para tratar los lodos. En este proceso se produce biogás, el cual puede ser empleando directamente como gas combustible o para la

producción de electricidad debido a su poder calorífico ( $21.5 \text{ MJ Nm}^{-3}$ ); el biogás debe pasar por un tratamiento adecuado para poder transformarlo en energía eléctrica, térmica o mecánica (Mantilla *et al.*, 2017). En lo que se refiere al reuso del agua, según la CONAGUA (2019), se estimó que en 2018 se reusaron directamente cerca de  $43.8 \text{ m}^3/\text{s}$  de aguas residuales tratadas, lo que representa el 50.2% respecto de los  $87.09 \text{ m}^3/\text{s}$  que fueron tratados en dicho año. Sin embargo, respecto al uso de agua tratada como agua de primer uso, se estimó en  $8.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir, apenas un 9.3%.

Debido al escenario anteriormente descrito, el objetivo de este trabajo es proporcionar una visión actualizada de la situación que guardan las plantas de tratamiento de agua residual en México, considerando dos aspectos fundamentales: la autosuficiencia energética y la reutilización del agua, como tendencias mundiales sostenibles en la operación de los sistemas de depuración. Esta consideración viene dada debido a que en la actualidad se presentan diferentes alternativas basadas en la gestión sustentable del agua, como son: la seguridad hídrica, la economía circular, la innovación social, la agricultura sintrópica y la simbiosis industrial, entre algunas otras, que abonan a la sustentabilidad y pretenden dar opciones para que los sistemas de producción y consumo disminuyan los impactos generados al ambiente.

En este sentido, la sustentabilidad se entiende como un compromiso efectivo de contribuir a la conformación de una nueva etapa civilizatoria, que armonice la vida de los seres humanos y que promueva el desarrollo socioeconómico con equidad y actitud respetuosa al medio ambiente para conservar la vida en el largo plazo (Gil Corrales, 2007; Gutiérrez Garza, 2007).

La sustentabilidad en los recursos hídricos implica lograr un acceso equitativo al agua, mejorar su calidad, mejorar los servicios de saneamiento e implementar tecnologías para su reutilización, tratamiento y reciclaje, para así lograr implementar la gestión integrada y el uso eficiente de los recursos hídricos, como se procura en el objetivo 6 de la Agenda 2030 (ONU, 2022). Hoy en día, la reutilización del agua tratada, así como la

posibilidad de utilizar los lodos residuales obtenidos en el tratamiento de agua para generar biogás y con éste energía para la autosuficiencia energética, son estrategias de la economía circular que pretenden disminuir los impactos económicos y ambientales en el tratamiento de aguas residuales (Smol, Mejia y Howarth, 2023).

El presente trabajo se justifica en dos aspectos. Por un lado, un aspecto teórico que viene dado por la necesidad de conocer de manera integral la información sobre las condiciones de las plantas de tratamiento de agua residual desde la visión de la economía circular; por otro lado, un aspecto social, ya que proporcionará información confiable para la toma de decisiones en los sectores académico, económico y gubernamental.

## **Materiales y métodos**

Se llevó a cabo una investigación de tipo exploratoria-descriptiva basada en métodos cuantitativos. Se inició con una búsqueda general de información documental que contuviera datos sobre la operación de las plantas de tratamiento de agua residual en México. Concretamente esta búsqueda se realizó en los sitios oficiales relacionados con el tema de agua, como son, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y páginas web de organizaciones oficiales reconocidas en el tema, como la Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México A.C. (ANEAS).

Las principales bases de datos tomadas en cuenta para llevar a cabo el presente estudio fueron el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, que contiene información del año 2020, y el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación 2021 de la CONAGUA, así como sus históricos hasta el 2004. Estos inventarios nacionales de plantas de potabilización y tratadoras de agua residual son documentos que se publican anualmente por parte de la CONAGUA y la SEMARNAT, en ellos se resume

de manera general las PTAR y las potabilizadoras por cada Estado de la República Mexicana; incluyen datos sobre el nombre de la planta, caudal tratado, la capacidad instalada, el cuerpo receptor, tipo de reutilización de agua y el organismo responsable de la operación de la planta.

Con respecto al Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, es el séptimo programa estadístico desarrollado por el INEGI de este tipo y tiene por objetivo generar información estadística de la gestión y desempeño de las Instituciones Públicas Municipales con relación a temas como seguridad pública, saneamiento, residuos sólidos, entre otros (INEGI, 2021).

La información contenida en el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México y en los Inventarios Nacionales de PTAR fue analizada por medio de estadística descriptiva para obtener tendencias y comportamientos respecto a la reutilización de agua y tipos de tratamiento de los lodos residuales. Se tomaron en cuenta los tabulados básicos correspondientes al tema del tratamiento del agua y las plantas de tratamiento. Por último, respecto a la información bibliográfica obtenida en la búsqueda, a partir de palabras clave como “autosuficiencia energética” y “la reutilización del agua” en plantas de tratamiento de agua residual en México, se identificó la información más relevante que contribuyera a comprender el contexto de dichos temas en la actualidad.

## **Resultados**

Con respecto a la búsqueda de información relacionada con la operación de plantas de tratamiento de agua residual en México, se observó que los informes gubernamentales más recientes como “Situación del medio ambiente en México 2018” y las “Estadísticas del Agua en México 2019” proporcionan información general sobre el tratamiento de agua, principalmente promedios nacionales y estatales del agua tratada. Respecto a la búsqueda de datos con relación a la generación de lodos y el destino de éstos, se encontró que no se aborda información al respecto en dichos informes; y la información refe-

rente a datos sobre la reutilización de agua tratada o destino de ésta, es insuficiente.

Los datos para este estudio se obtuvieron de los Inventarios Nacionales de Plantas de Potabilización y Tratamiento de Agua Residual, así como del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México. A continuación, se describen los principales resultados encontrados.

### Número de PTAR en operación

Según el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Agua Residual 2021, en México se tenían registradas 2,872 plantas municipales en operación con una cobertura del 67.5% de tratamiento de agua residual y un caudal tratado de 145,341.0 L/s (CONAGUA, 2021). Se observó un crecimiento lineal en el número de plantas de tratamiento de agua instaladas en el país, a partir del dato más antiguo que es del año 1992, donde se contaba con 394 plantas en operación y un caudal tratado de 30,554 L/s; esto significa que hubo

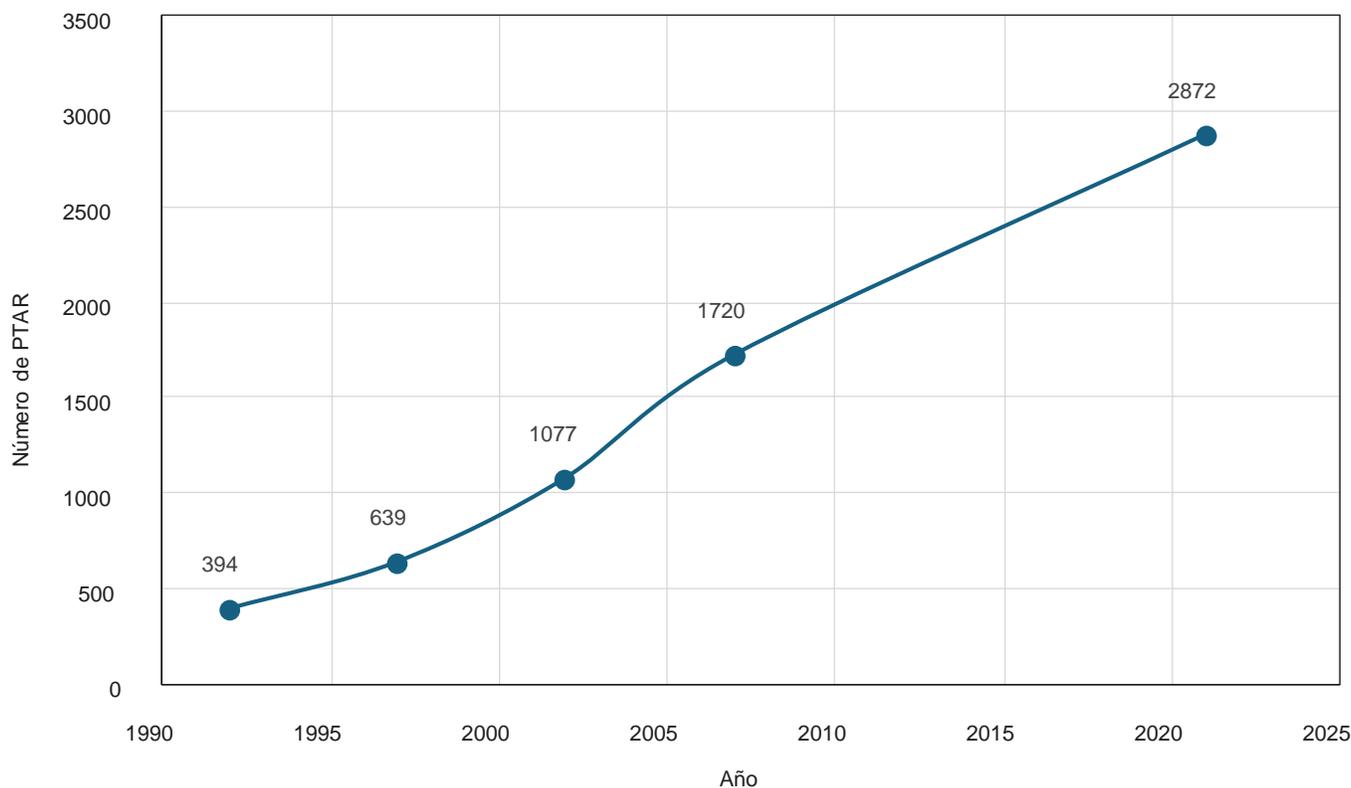
un crecimiento aproximado en la instalación de PTAR de 25% anual durante un período de 29 años (CONAGUA, 2004). En la **Figura 1** se muestra este incremento en el número de plantas en operación a través del tiempo.

### Procesos empleados en las PTAR

Un aspecto importante en la operación de las plantas de tratamiento de agua residual municipal es el tipo de proceso que emplean para el tratamiento biológico. En ese aspecto, los principales procesos biológicos empleados en México en el año 2021 son lagunas de estabilización con 843 plantas, correspondiente al 29.3%; lodos activados con 818 plantas, correspondiente al 28.4%; reactores anaerobios de flujo ascendente con 390 plantas, correspondiente al 13.5%; humedales artificiales con 230 plantas, correspondiente al 8% y tanque séptico con 143 plantas, correspondiente a un 4.9%.

### Caudal tratado

El caudal tratado es un dato que permite conocer el



**Figura 1.** Comportamiento del número de plantas de tratamiento de agua residual en operación en México. Fuente: Elaboración propia con base en los Inventarios Nacionales de Plantas de Tratamiento de Agua Residual de la CONAGUA.

tamaño de la planta de tratamiento. En este sentido, los datos analizados se separaron en dos rangos: caudal tratado mayor de 200 L/s y caudal tratado menor a 199 L/s. Se encontró que en México el 5.8% de las plantas trabaja con un caudal mayor a 200 L/s, es decir, sólo 166 plantas, mientras que el 94.2% restante son plantas pequeñas que operan con caudales menores a 199 L/s (CONAGUA, 2021).

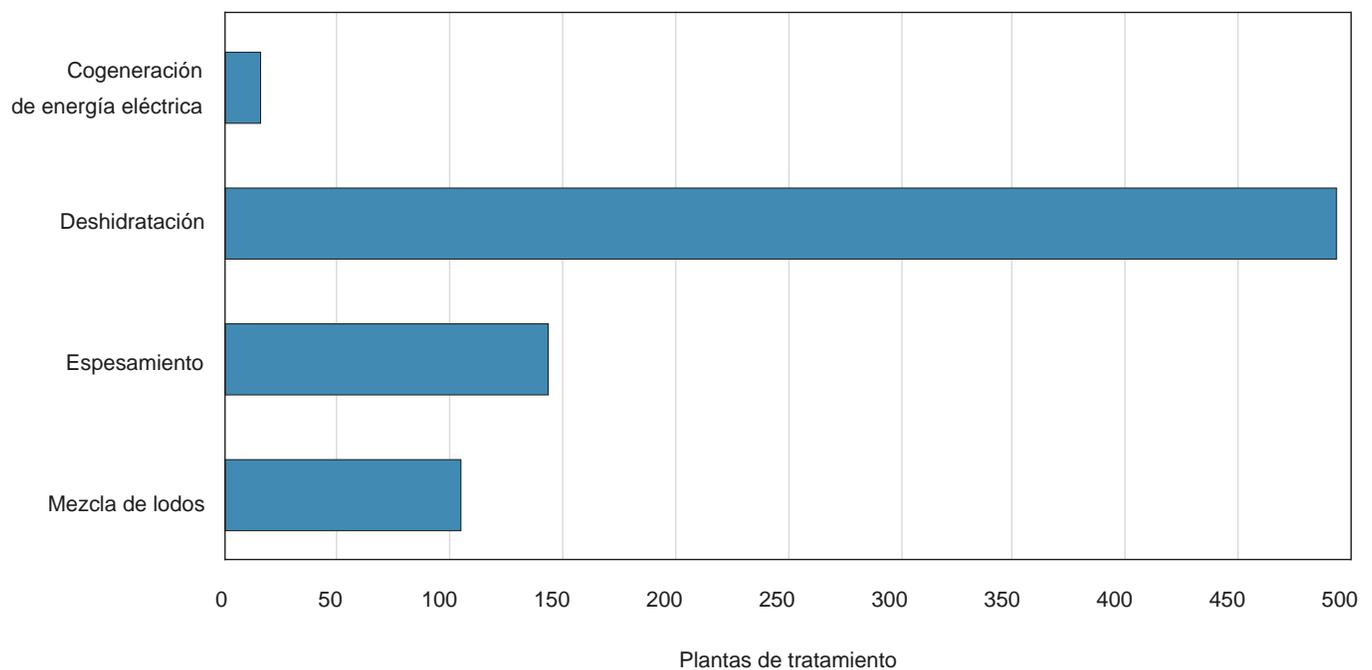
### Tratamiento de lodos residuales generados en las PTAR

De acuerdo con el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, de las 2505 plantas en operación en el año 2020, un total de 565 plantas dan tratamiento a los lodos generados, lo que corresponde al 22.5%, mientras que el resto no da tratamiento o reporta que no aplica. Con respecto a los principales tratamientos aplicados a los lodos residuales generados en el tratamiento del agua, 493 plantas emplean la deshidratación, 143 plantas emplean el espesamiento de lodos y únicamente 15 plantas emplean la cogeneración de energía eléctrica, como se muestra en la **Figura 2**.

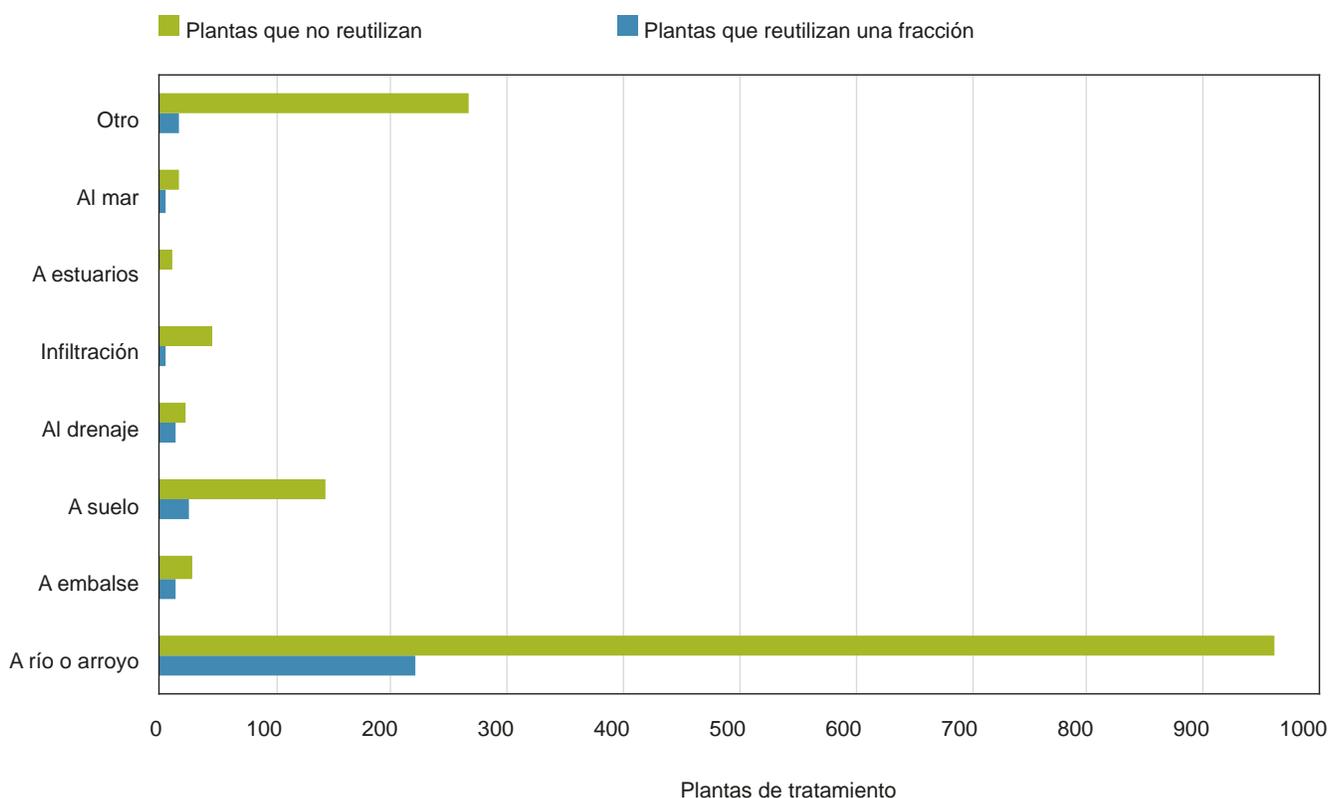
### Destino del agua tratada

Respecto al destino del agua residual, el Censo contempla plantas que reutilizan una fracción del agua y plantas que no reutilizan; en este sentido, en lo que respecta a las plantas que reutilizan una fracción del agua, de las 2505 plantas en operación en el año 2020, los dos principales destinos son descarga directa al río o arroyo, con 219 plantas, y descarga directa al suelo, con 26 plantas; en el caso de las plantas que no reutilizan el agua, se observan tres principales destinos: 960 plantas descargan directo a río o arroyo, 142 plantas al suelo y 265 refieren otro destino, sin especificar el tipo de destino que se aplica, tal como se muestra en la **Figura 3**.

Ahora bien, en un análisis de la evolución del destino del agua tratada en las plantas en México, se revisaron los datos históricos disponibles de los Inventarios Nacionales de Plantas de Tratamiento de Agua Residual, se tomó en consideración el inventario más antiguo correspondiente al año 2004 y el más reciente disponible, correspondiente al año 2021. En la **Tabla 1** se muestra la comparativa del destino del agua tratada para ambos años. Se puede observar que a pesar de que el número de plantas



**Figura 2.** Tipo de tratamiento aplicado a los lodos residuales en plantas de tratamiento de agua municipal. Datos tomados del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI.



**Figura 3.** Destino de la descarga de agua tratada en las plantas de tratamiento de agua residual municipal. Fuente: Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI.

pasó de 1300 a 2872 en un período de 17 años, los porcentajes de reutilización del agua tratada no aumentaron; por el contrario, para el caso de reutilización para riego e infiltración, disminuyeron, y para el caso de descarga a cuerpo de agua, tuvo un incremento mínimo de 5.7%.

### Discusión

Con el análisis realizado sobre el número de plantas instaladas, se pudo constatar que hay un crecimiento positivo en el número de ellas, el cual se calculó cercano a un 25% anual en los últimos 29 años; lo anterior significa que hay una tendencia positiva en el crecimiento de número de plantas instaladas en

el país. Respecto a los procesos empleados en las PTAR en México, se identificaron tres principales: las lagunas de estabilización, que son procesos de tratamiento poco eficientes pero económicos en operación y mantenimiento; los lodos activados, que son procesos que requieren de insumos energéticos y por ello, costos de operación elevados; y por último, los reactores anaerobios, que entre sus características está la generación de biogás, como producto del proceso.

El aprovechamiento y valorización de los lodos residuales es una estrategia que cae dentro de la economía circular, en la cual la disposición de estos residuos en el relleno sanitario es la última opción;

**Tabla 1.** Comparativa de la reutilización del agua en México para el período de 2004 a 2020.

Año	Plantas en operación	Destino del agua tratada		
		Riego (agrícola, área verde)	Infiltración	Cuerpo de agua
2004	1300	11.8%	4.2%	84%
2021	2872	7.8%	2.5%	89.7%

\*Datos tomados de los Inventarios Nacionales de Plantas Potabilizadoras y Tratamiento de Agua Residual de la CONAGUA.

por el contrario, se trata de aprovechar su potencial para obtener recursos que permitan satisfacer las necesidades energéticas de la misma planta a través del desarrollo de tecnologías e innovaciones que hacen cada vez más accesible su implementación (Gherghel *et al.*, 2019).

Tal como lo aseguran Tang y colaboradores (2019), las PTAR Municipales enfrentarán grandes desafíos en los próximos años; uno de ellos es encontrar la forma de disminuir el consumo energético y la recuperación de electricidad para llegar a una autosuficiencia energética; esto debido a los cambios que se requieren en la administración pública de las plantas, así como en las políticas gubernamentales enfocadas a la gestión del agua residual.

Ahora bien, tomando en consideración que las plantas que presentan viabilidad financiera para generar energía eléctrica a partir de la digestión anaerobia de los lodos residuales son aquellas plantas que trabajan con un caudal mínimo de 200 L/s (Mantilla *et al.*, 2017; Saravia Matus *et al.*, 2022), se determina que únicamente el 5.8% de las plantas en México, es decir, cerca de 166 plantas, podrían obtener energía eléctrica a partir de la digestión anaerobia de los lodos residuales generados para ser autosuficientes energéticamente; esta información pone de manifiesto la importancia de encontrar alternativas de autosuficiencia energética para el 94% restante de las plantas en México. Además, ya se tienen identificados los tratamientos que parecen ser más prometedores en términos de eficiencia y costos como la digestión anaerobia y la codigestión con otros residuos orgánicos (Volschan *et al.*, 2020).

Es importante resaltar que, en México, al menos 17 plantas que emplean la estabilización anaerobia y generación de biogás han logrado generar energía eléctrica; estas son: la Planta de Villa Álvarez en Colima, La Principal en Coahuila, la Purísima del Rincón y León en Guanajuato, Atotonilco en Hidalgo, Agua Prieta y el Ahogado en Jalisco y San Pedro Mártir en Querétaro, las restantes realizan la combustión del biogás generado (Mantilla *et al.*, 2017). Surge aquí el primer desafío: lograr que todas las plantas que emplean la digestión anaerobia logren aprovechar el biogás y lo utilicen

como fuente de energía eléctrica. El otro desafío será generar las estrategias para aprovechar el potencial de las 166 plantas que están más cerca de transitar a la autosuficiencia energética. Es por ello, que cualquier esfuerzo normativo, técnico, político, económico y ambiental contribuye a superar dichos desafíos y por lo tanto, a mejorar la gestión de las PTAR.

El aspecto más preocupante son las alternativas para el 94% de las plantas en México que, por su tamaño, aún no son viables para generar electricidad a partir de los lodos residuales, por lo que habrá que estudiar y encontrar alternativas para dichas plantas de manera que se encuentren otros caminos por medio de los cuales puedan transitar a la economía circular.

En lo que respecta a la reutilización del agua, pudo identificarse que los usos más comunes son, por un lado, para riego tanto de áreas verdes como agrícola, con un 11.8% en 2004, y 7.8% en 2021; esto puede significar que aunque aumentó el número de plantas de tratamiento de agua residual, no aumentó en la misma proporción las plantas que destinan el agua tratada para riego; y por otro lado, la reutilización como infiltración, de 4.2% de los casos en 2004 y de 2.5% en 2021, indican que aunque han aumentado el número de plantas instaladas, no se ha incrementado la reutilización del agua para infiltración. El principal destino del agua tratada en México es la descarga en ríos, arroyos, canales, lagos, entre otros, esto sin duda beneficia a la conservación de los ecosistemas acuáticos, aunque podría diversificarse el destino del agua tratada para disminuir la escasez de esta o la demanda de agua de primer uso.

Sin duda se deben trabajar estrategias que promuevan la reutilización del agua generada en las plantas de tratamiento de agua residual. Como bien mencionan Sarabia y col. (2022), la reutilización del agua tiene múltiples ventajas, entre ellas, ahorros energéticos, reducción de la extracción de agua de diversas fuentes, además de generar un sistema sostenible con el tiempo. Además, apoyar en este contexto impacta a la seguridad energética, que es otro tema preocupante en la actualidad.

Las condiciones para la reutilización del agua

tanto para el riego en la agricultura y áreas verdes como para usos industriales ya han sido estudiadas en diferentes partes del mundo y se observa que es una posibilidad de bastante potencial que beneficia a la creciente demanda de agua y la disminución del consumo de agua dulce. Sin embargo, aún es necesario establecer directrices y normatividad para su reutilización, como tarifas, calidad, confianza pública, así como determinar las tecnologías más aptas para los diferentes sitios (Adewumi *et al.*, 2010; Berardi y Pollice, 2017; Salgot y Folch 2018). Además, de acuerdo con la ANEAS (2023), los principales retos a impulsar en México para lograr la reutilización del agua en el riego, en la industria, en el comercio, así como agua de primer uso, son los políticos y regulatorios, así como la institucionalización de los organismos operadores de las plantas.

En la búsqueda de los avances en el estudio de los impactos positivos y negativos de las plantas de tratamiento de agua residual, así como aplicabilidad de la economía circular, se han podido encontrar algunos antecedentes relevantes. Entre ellos se encuentra un estudio sobre la problemática de las aguas residuales, en el cual el autor expone que el solo tratamiento de las aguas residuales para reutilización no es suficiente (Monroy Hermosillo, 2021).

La investigación de Nguyen y colaboradores (2022), después de establecer los beneficios que tiene la reutilización del agua y reutilización de los lodos residuales en base a la economía circular, concluye que, en definitiva, se debe adoptar la economía circular para fomentar la innovación y prácticas de gestión sostenible de los lodos, así como la necesidad de proporcionar información a las autoridades del agua para que inviertan en opciones de reutilización sostenibles para el tratamiento de lodos.

## Conclusiones

La información sobre la generación y destinos de los lodos residuales, así como del destino del agua tratada en las plantas de tratamiento de agua residual municipal en México, es escasa. Dicha información

es importante para conocer las posibilidades de las plantas para transitar a una operación basada en la economía circular y aprovechar el potencial de los residuos generados, así como del agua tratada. Se considera que dicha información podría incluirse en los próximos censos y con ello, contribuir al desarrollo de la investigación y tecnología en lo que respecta a la solución del problema de las plantas de tratamiento de agua residual.

En relación con la autosuficiencia energética, si bien ya es una realidad con algunos casos exitosos en el país, aún existe un gran número de PTAR que tienen el potencial, pero no aprovechan el biogás generado; otras tienen las condiciones, pero no se contempla. El principal problema es que alrededor del 94% de las plantas en el país (cerca de 2700) no cuentan con el principal requisito para generar energía eléctrica a partir de los lodos residuales; se trata del caudal, es decir, el tamaño de la planta. Esto indica que se deben buscar otras maneras de que dichas plantas puedan transitar a una operación sustentable basada en la economía circular.

En lo que respecta a la reutilización del agua, en México se reusa cerca del 10% del agua tratada para riego agrícola y de áreas verdes, así como infiltración; el resto del agua tratada se descarga directamente a cuerpos de agua, contribuyendo con ello a la conservación de los ecosistemas acuáticos, pero desaprovechando la posibilidad de reusar el agua como agua de primer uso, ya sea en el sector agrícola o industrial, lo que contribuiría también a la disminución de la extracción de agua y combatir la escasez de la misma.

En general, se visualiza la necesidad de estrategias normativas, regulatorias y políticas que puedan influir en una operación de las plantas de tratamiento de agua con menores impactos negativos tanto ambientales como económicos y mayores impactos sociales positivos. La transición de la operación de las PTAR municipales a una economía circular es una oportunidad de mejorar la gestión de los recursos hídricos y asegurar las condiciones de supervivencia de las generaciones futuras.

## Referencias

- Adeyemi JR, Ilemobade AA, Van Zyl JE (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential and challenges. *Esources, Conservation & Recycling* 55(2):221-231. doi:10.1016/j.resconrec.2010.09.012.
- ANEAS (2023). *Reúso de agua tiene beneficios ambientales y económicos: experto*. ANEAS. <https://www.aneas.com.mx/post/reuso-agua-beneficios-ambientales-economicos-experto> [consultado el 24 de agosto de 2023].
- Berardi G, Pollice A (2017). Closing the water cycle in the agro-industrial sector by reusing treated wastewater for irrigation. *Journal of Cleaner Production* 164:587-596. doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.239.
- Castañeda Villanueva AA (2020). Evolución de la gestión del agua en municipios de México: estudio de un organismo público descentralizado en los altos Jalisco. *Agua y Territorio* 17:33-54. doi:10.17561/at.17.5518.
- CONAGUA (2004). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación 2004*. CONAGUA. [consultado el 20 de julio de 2023].
- CONAGUA (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. Comisión Nacional Del Agua. [files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM\\_2019.pdf](files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf) [consultado el 22 de julio de 2023].
- CONAGUA (2021). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación 2021*. CONAGUA. [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario\\_2021.pdf](www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf) [consultado el 26 de julio de 2023].
- Gherghel A, Teodosiu C, De Gisi S (2019) A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production* 228:244-263. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.240.
- Gil Corrales MÁ (2007). *Crónica Ambiental. Gestión pública de Políticas Ambientales en México*. (Primera). Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Gutiérrez Garza E (2007). De las teorías del desarrollo al desarrollo sustentable. Historia de la construcción de un enfoque multidisciplinario. *Trayectorias IX* (25):45-60.
- INEGI (2021). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2020*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2021/> [consultado el 31 de julio de 2023].
- Lahera-Ramón V (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera Revista de Estudios Territoriales* 12 (2):58-69.
- Ley de aguas nacionales (2023). Ley de aguas nacionales. En *Diario Oficial de la Federación* (pp. 1–118). Diario Oficial de la Federación (DOF). <diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>.
- Mantilla G, Sandoval L, Ramírez EM, Gásca S, Navarro J, Hernández N, García JL, Esquivel A, Calderón CG (2017). *Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales*. IMTA, [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/energia-limpia/files/assets/common/downloads/publication.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/energia-limpia/files/assets/common/downloads/publication.pdf).
- Mihelcic J, Zimmerman J (2011). *Ingeniería Ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. (1a Ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Monroy Hermosillo O (2021). Problemática de las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal* 12 (2):40-44.
- Nguyen MD, Thomas M, Surapaneni A, Moon EM, Milne NA (2022) Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. *Environmental Technology & Innovation* 28:102651. doi:10.1016/j.eti.2022.102651.
- ONU (2022). *Objetivos del Desarrollo Sustentable 2030*. Organización de Las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Salgot M, Folch M (2018) Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2:64-74. doi:10.1016/j.coesh.2018.03.005
- Saravia Matus S, Gil M, Fernandez D, Montañez A, Blanco E, Naranjo L, Llavona A, Sarmanto N (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe. In *Serie Recursos Naturales y Desarrollo, CEPAL*.
- SEMARNAT (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Silva JA (2015). Escenario actual de la gestión comunitaria del agua en México respecto a América Latina y el Caribe. *XX Congreso Internacional de Contaduría, Administración e Informática*, Ciudad Universitaria, México DF.
- Smol M, Mejia A, Howarth M (2023) Business Opportunities in the Water and Wastewater Sector Through the ReSOLVE

Framework. In: Smol M, Prasad MNV, Stefanakis AI (eds) *Water in Circular Economy*. Springer International Publishing, Cham, pp 225-233. doi:10.1007/978-3-031-18165-8\_17.

Tang J, Zhang C, Shi X, Sun J, Cunningham JA (2019). Municipal wastewater treatment plants coupled with electrochemical, biological and bio-electrochemical technologies: Opportunities and challenge toward energy self-

sufficiency. *Journal of Environmental Management* 234:396-403. doi:10.1016/j.jenvman.2018.12.097.

Volschan Junior I, de Almeida R, Cammarota MC (2021) A review of sludge pretreatment methods and co-digestion to boost biogas production and energy self-sufficiency in wastewater treatment plants. *Journal of Water Process Engineering* 40:101857. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101857.

# *Ciencia Nicolaita*

## **Normas editoriales**

Sólo se recibirán materiales originales, inéditos, exclusivamente postulados, en español o inglés, que hagan una aportación relevante al conocimiento de las ciencias físicas, de la vida, matemáticas, químicas, de la salud, ingenierías y arquitectura que en ningún modo difieran de la práctica editorial de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, estipulada en su normativa editorial y vigilada de manera permanente por el Comité Editorial de Ciencia Nicolaita y el Consejo Editorial de la UMSNH.

Las propuestas de contribuciones deberán cumplir con lo siguiente:

**1.-** El manuscrito siempre **deberá estar acompañada con una CARTA AL EDITOR**, indicando el tipo de contribución que se propone:

*a.- Volúmenes Monográficos relacionados con las áreas del conocimiento mencionadas y a una CONVOCATORIA ESPECÍFICA.*

*b.- Artículos extensos con datos científicos originales que demuestren rigor en su metodología, resultados y discusión*

*c.- Artículos de Revisiones del trabajo científico de investigadores nicolaitas o de externos por invitación*

*d.- Artículos de análisis y debates científicos actuales.*

*e.- Reseñas de temas relevantes obtenidas a partir de obra (libros), entrevistas, congresos y simposios nacionales e internacionales*

*f.- Artículos de educación de cada área científica con referencias críticas en el desarrollo de técnicas o materiales de enseñanza*

*g.- Noticias de la comunidad científica universitaria (premios, congresos, patentes, logros)*

**2.-** La presentación del **primer manuscrito deberá ser en formato PDF**, a doble espacio con fuente Times New Roman de 12 puntos. La extensión de los artículos propuestos en general no podrá sobrepasar las 25 cuartillas, y 7 figuras como máximo, incluyendo datos del autor (nombre, adscripción institucional, dirección profesional, correo electrónico, teléfono de contacto e identificador ORCID). Todas las colaboraciones deben contar con un título y resumen en español y otro en inglés (incluidos el título y las palabras clave) que no supere las 120 palabras, además de máximo 5 palabras clave en ambos idiomas.

**3.- Las ilustraciones, gráficas, cuadros y tablas se enviarán intercaladas después de su primera mención en el texto en el lugar que corresponda.**

**4.- EN CASO DE SER ACEPTADO EL MANUSCRITO, las ilustraciones, gráficas, cuadros y tablas se podrán enviar por separado** (formatos tiff o jpg a 300 dpi como mínimo), en un archivo “Lista de Figuras y Tablas” (Caption Figures) numerados consecutivamente, o bien incluir figuras de alta calidad en el texto en Word después de su primera mención, las tablas serán incluidas en formato de Word y no como imágenes.

**5.-** Los textos destinados **a la sección de reseñas y noticias** no podrán exceder las 5 cuartillas, ni comentar libros o artículos que hayan sido publicados hace más de tres años o que no cuenten con ISBN. Los autores de este tipo de colaboraciones deberán incluir una referencia bibliográfica detallada de la obra (autor, título, lugar de edición, editorial, colección, número de páginas e ISBN).

**6.-** Todo el material del manuscrito (texto y figuras) deberá subirse directamente a la plataforma OJS3/PKP y en paralelo **TAMBIÉN enviar la misma versión** digital a la dirección de correo electrónico: [ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx](mailto:ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx)

## **7.- Referencias**

Las **referencias a artículos** respetarán el siguiente modelo:

Apellido(s), nombre(s) abreviado seguidos por un punto, fecha, título seguido por una coma, seguido por el nombre de la revista o editorial en itálicas sin abreviación, seguido por el número de páginas, p. o pp. Si la referencia cuenta con el registro se deberá indicar el ISSN e incluir el DOI.

*Ejemplo:* Fitz-Díaz E, Lawton TF, Juárez-Arriaga E, Chávez-Cabello G (2018). The cretaceous-paleogene Mexican orogen: Structure basin development, magmatism and tectonics: *Earth Science Reviews* 183: 56–84.

Para las **referencias a libros o capítulos de libro** se seguirá una regla similar a los artículos, pero en este caso se deberá indicar en itálica la Editorial y se deberá indicar el ISBN.

*Ejemplo:* Fegley E (2013). Practical chemical thermodynamics for geoscientists: *Amsterdam, Academic Press (Elsevier)*, p. 674. ISBN: 9780128102701.

**Capítulos de libro:** Apellidos, nombre(s) abreviados, fecha entre paréntesis, título en letra normal entrecomillado, nombre del autor o autores de la obra colectiva (libro), título de la obra en itálicas, lugar de edición, editorial, año de edición y páginas que comprende el capítulo. Se deberá indicar el ISBN.

**Las referencias de tesis** deben comprender lo siguiente:

Nombre y apellido(s) del autor (si lo hay), fecha, título, nombre de la Institución en itálicas, señalar el grado de la tesis, indicar si incluye mapas o material audiovisual, seguido por el número de páginas.

*Ejemplo:* Gómez-Rivera FJ (2019). Análisis petrológico e isotópico del Complejo Batolítico Aquila, suroccidente de México: Tesis de Maestría en Ciencias con especialidad en Geociencias, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, Pp.103.

Las **referencias hemerográficas** deben comprender lo siguiente:

Nombre y apellido(s) del autor (si lo hay), título abreviado de la nota o artículo (si cuenta con ella), nombre de la publicación en itálicas, lugar de impresión, fecha, p. o pp., seguido por el número de páginas.

*Ejemplos:* Rafael Nieto Compeán, “Lo que México podría hacer”, *Excélsior*, Ciudad de México, 19 de septiembre de 1921, p. 2A; Sin autor, “La delincuencia en su apogeo”, *El Globo*, Ciudad de México, 23 de febrero de 1925, pp. 1-2.

Las **referencias electrónicas** observan la misma lógica y se integran como sigue:

Apellido(s) y nombre (s) del autor o de la entidad responsable, título en letra normal entrecomillado, título del portal, dirección electrónica y fecha de consulta entre corchetes.

*Ejemplo:* The United Nations Office at Geneva (Library & Archives), “Mandate of the Institutional Memory

Section”, [http://www.unog.ch/80256EE60057D930/\(httpPages\)/555411BC07897556C1257C85004A5725?OpenDocument](http://www.unog.ch/80256EE60057D930/(httpPages)/555411BC07897556C1257C85004A5725?OpenDocument), [consultado el 14 de febrero de 2021].

**8. No se aceptará** ninguna contribución que no se ajuste a estas normas técnicas.

### **9.- Acerca de la Revisión**

Todos los artículos serán enviados a dictamen doble ciego con especialistas externos y/o extranjeros (el formato de dictamen es público y puede consultarse en el sitio electrónico de la revista), cuyo resultado será sancionado por el editor de la publicación, quien, a través de un tercer dictamen, en el caso de ambigüedad o controversia, podrá determinar, solo o en compañía del Comité Editorial, el resultado del procedimiento. El Comité Editorial y el editor de la revista se reservan el derecho de solicitar modificaciones no previstas en los dictámenes para aprobar la publicación de estas colaboraciones. El autor será notificado del resultado de los anteriores en un periodo no mayor a dos meses.

**10.-** Todos los autores recibirán un ejemplar de la edición en formato PDF y al aceptar su publicación se acepta de manera implícita y legal otorgar los derechos de reproducción de sus respectivas colaboraciones a la revista *Ciencia Nicolaita* y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a fin de que puedan ser editadas, publicadas y difundidas tanto en versión impresa como electrónica.

**11.-** El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja en modo alguno el punto de vista de la Revista *Ciencia Nicolaita* o de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## **Artículos aceptados**

Después del proceso de arbitraje, el dictamen sobre la aceptación o rechazo del trabajo será comunicado por el Editor al autor responsable, con las indicaciones correspondientes que sustenten la decisión emitida.

## *Página legal y créditos*

**CIENCIA NICOLAITA**, Año 32 no. 91, agosto de 2024, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36, 443 327 23 66, y 443 322 35 00, <http://www.cic.cn.umich.mx>, [ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx](mailto:ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx). Editor: Dr. José López Bucio. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2., Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36y Fax 443 327 23 66. Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Hugo César Guzmán Rivera, fecha de última modificación, 21 de septiembre de 2022.

Ciencia Nicolaita no. 91 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

**Fotografía de la portada:** Línea de costa, reserva natural de Paracas.

### ***Derechos de uso***

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP.