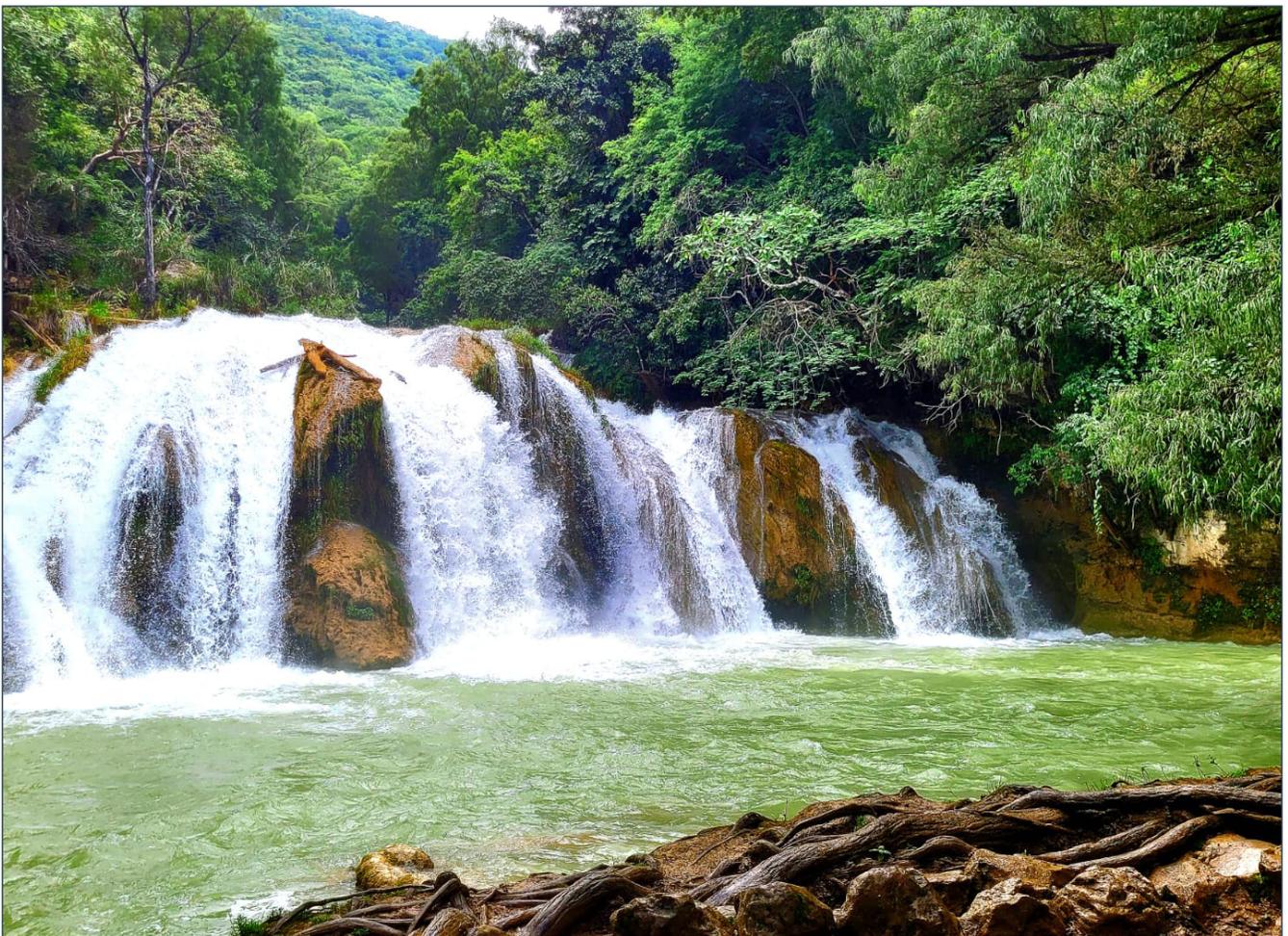


CN *Ciencia
Nicolaita* **92**



Diciembre 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

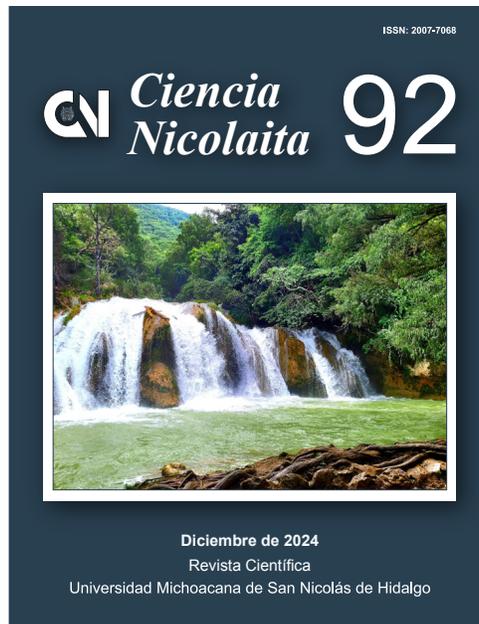
Comité Editorial

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 Shidarth 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 Ambriz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Apoyo editorial y maquetación: Fidel Anguiano Rodríguez.



Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Revista Ciencia Nicolaita número 92, diciembre de 2024
<https://www.cic.cn.umich.mx/cn>

Portada: Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas.

Directorio	i
Contenido	ii
Presentación	v

FÍSICO-MATEMÁTICAS Y CIENCIAS DE LA TIERRA

Modelo experimental de fondo móvil para determinar la evolución de un perfil de playa

Karina Griselda Ocaña Espinosa de los Monteros, Cindy Casas Valencia, Karla Monserrat Virrueta Sánchez 1

Validación de la estimación de flujos subterráneos para la zona de La Mintzita mediante el uso de mapas PGR y la modelación hidrológica en WEAP

Heidy Janette Alcantar Mondragon, Sonia Tatiana Sánchez Quispe , Julio César Orantes Ávalos, María del Mar Navarro Farfán  9

Análisis de reconstrucción de series históricas en base a algoritmo estocástico y algoritmo IDW	
Alejandra Correa González, Marco Antonio Martínez Cinco  , Joel Hernández Bedolla  , Sonia Tatiana Sánchez Quispe  , Mario Alberto Hernández Hernández  .	19
Evaluación hidráulica de la red de agua potable de San Martín Sabinillo, Oaxaca	
Oscar Jesús Llaguno Guilberto  , Juan Maldonado Silvestre, Raúl Medina Mendoza, José Manuel Rodríguez Varela, Norma Ramírez, Jomaelah Morales Rayo, Eduardo López López.	30
Análisis diagnóstico de la problemática del recurso hídrico en el estado de Colima, México, desde un enfoque sistémico	
Maura González Robles  y Ana Luz Quintanilla Montoya 	37
Emergencias ante fenómenos naturales, la cultura de la prevención	
Humberto Iván Navarro Gómez  , María del Refugio González Sandoval  , Christopher Contreras López  , Jairo Armando Lozano Hernández  , Jesús Emmanuel Cerón Carballo 	46
Evaluación de las olas de calor en la Ciudad de Morelia	
América Olimpia Martínez Granados  , Liliana García Romero, Sonia Tatiana Sánchez Quispe	56
Comparativa entre los modelos de precipitación-escurrimiento HBV y Témez a escala mensual. Caso de estudio Cuenca del Lago de Cuitzeo	
Ulises Helios Méndez Vallejo, José Guadalupe García Contreras, Jesús Pardo Loaiza*, Liliana García Romero, Sonia Tatiana Sánchez Quispe	64
Propiedades químicas e índice de amortiguamiento a la contaminación de suelos urbanos	
Mariela Casillas Corona  , María Alcalá De Jesús, Francisco Bautista Zúñiga, Bertha Aguilar-Reyes, Avto Goguitchaichvili, Ma. del Carmen Delgado, Thomas Ihl†	76
 BIOLOGÍA Y QUÍMICA	
Evaluación de distintos sensores de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo de una plantación de <i>Pinus greggii</i> con fines de restauración ecológica	
Diana Santillán Gaona, José Luis Gallardo Salazar  , Cuauhtémoc Sáenz Romero  , Roberto A. Lindig Cisneros 	85
 INGENIERÍAS	
Simulación en GiD del problema de flujo de cavidad en 2D	
Gabriela Pedraza Jiménez  , Miguel Ángel Rodríguez Velazquez  , Ricardo Román Gutiérrez  , Francisco Javier Domínguez Mota 	95
Evaluación de la remoción de nitrógeno total en humedales con <i>Typha domingensis</i> y grava compacta	
Alondra Camargo Almaraz, Roberto García Acevedo, Jesús Alberto Rodríguez Castro, Ricardo Ruíz Chávez, Ezequiel García Rodríguez, Juan Pablo Molina Aguilar, Hugo Luis Chávez García	102

Determinación de la calidad de los tabicones no estructurales de la manufacturera Zoquite en Guanajuato Capital	
Luis Elías Chávez Valencia  , Francisco José Luna Rodríguez  , Elia Mercedes Alonso Guzmán  , Hugo Luis Chávez García 	107
Calidad de tabicones pesados con adición perlas de poliestireno pre-expandidas (EPS)	
Luis Elías Chávez Valencia  , Saul Villalobos Pérez  , Wilfrido Martínez Molina  , Mauricio Arreola Sánchez 	116
Descripción de recolector de lodos en un tanque sedimentador para el tratamiento de agua potable	
Jorge Eduardo Campos García, Renato González Bernal, Juan José Piña Castillo, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez, Víctor Daniel Jiménez Macedo	129
Anisotropía en la resistividad eléctrica de tres maderas mexicanas	
Javier Ramón Sotomayor Castellanos  , Sonia Correa Jurado, Nancy Eloísa Rodríguez Olalde, Faustino Ruiz Aquino	137

Presentación

El número 92 de *Ciencia Nicolaita* presenta avances en tres temas especialmente relevantes, el manejo del recurso hídrico, la sustentabilidad ambiental y el monitoreo de los ecosistemas, y la ciencia de los materiales. Los autores realizan innovaciones poniendo a punto tecnologías de vanguardia en sus diferentes áreas de especialidad, como el manejo de software, el modelaje experimental, y empleo de sensores de vehículos aéreos no tripulados, lo que nos indica el dinamismo y la importancia que representa la investigación científica en la resolución de diferentes tipos de problemas con gran impacto social.

En el artículo *Modelo experimental de fondo móvil para determinar la evolución de un perfil de playa* se revisan los efectos del oleaje en las secciones transversales de playa, representando la relación que existe entre la altura y periodo del oleaje con las características de los sedimentos que conforman una playa y la variabilidad en su geometría, aspectos relevantes en la ingeniería de costas.

El estudio de las variables climáticas como la temperatura y precipitación ha sido de mucha importancia en los últimos años, ya que impacta en el ciclo hidrológico. Correa González y coautores analizan las series de precipitación de acuerdo a la deducción de datos faltantes con base en algoritmos en estaciones en la región lacustre de Cuitzeo. Mediante un modelaje hidráulico, Llaguno y colaboradores realizan propuestas de mejora al servicio de agua potable, considerando el tiempo de operación, el uso de válvulas reductoras de presión y el manejo de la tubería de succión de las fuentes de almacenamiento del vital líquido, estimando los costos para la mejora de dicho sistema.

En su análisis de la problemática del recurso hídrico en el estado de Colima, González Robles y Quintanilla Montoya destacan la necesidad por parte de la población de contar con un cambio de visión sobre la importancia del agua, para aminorar apatías e incrementar el sentido de responsabilidad para un uso más eficiente y racional de este recurso. Una mejor cultura organizativa también coadyuva en la prevención de desastres naturales, como las inundaciones, particularmente dentro de las comunidades más expuestas a estos riesgos. Navarro Gómez y colaboradores proponen un enfoque multidisciplinario con herramientas para afrontar de manera más eficaz los desastres hídricos, ofreciendo una nueva perspectiva sobre cómo mejorar la gestión del riesgo y mitigar los impactos en zonas vulnerables.

Los modelos de precipitación-escurrimiento son herramientas imprescindibles en hidrología, ya que permiten simular los procesos físicos del ciclo hidrológico que ocurren en una cuenca. Martínez-Granados y coautores realizan una comparación entre diferentes de modelos a escala mensual para determinar cuál representa mejor los escurrimientos en un contexto histórico en la cuenca del Lago de Cuitzeo, trabajo que también contribuye a una mejor evaluación del recurso hídrico. Alcantar Mondragón realizan un modelo de escurrimiento para definir la zona de infiltración del manantial La Mintzita, determinando los sitios potenciales de recarga.

Las olas de calor son un fenómeno climatológico de gran impacto en la sociedad y el medio ambiente. Lozano Hernández y Cerón Carballo proponen la aplicación de umbrales relativos en un periodo histórico, así como la aplicación de índices para estimar el grado de exposición en la Ciudad de Morelia. Dicha estimación plantea un grado medio a alto en la zona sur del municipio, un riesgo bajo en la zona centro, dejando la zona norte en un grado de severidad alto. Esto contribuye al conocimiento sobre las zonas con mayor incidencia para establecer medidas de mitigación o adaptación.

La contaminación ambiental representa un problema en el aire, agua y suelo, en gran parte debido al crecimiento de la mancha urbana. Casillas Corona y coautores desarrollan un índice de amortiguamiento a la contaminación del suelo por metales pesados a partir de sus propiedades químicas en la ciudad de Morelia. Aquí se determina que una baja capacidad amortiguadora del suelo ante los metales pesados, incrementa el daño a la población humana expuesta a las partículas y polvo contaminado. Para la limpieza de aguas residuales, Camargo Almaraz y coautores evalúan un humedal construido con grava compacta, utilizando como vegetación *Typha domingensis*, con resultados muy promisorios, ya que las plantas remueven alrededor del 70% del nitrógeno total, un contaminante orgánico y ambiental cuando no se trata apropiadamente. Por otra parte, Campos García y colaboradores presentan el diseño de un sistema automatizado para extraer los lodos contaminantes en las plantas potabilizadoras de agua de forma más eficiente, modificando la purga que se hace de forma manual y evitando la acumulación de los lodos en el tanque.

La evaluación de las plantaciones forestales es de gran importancia en el área de la restauración ecológica. Santillán Gaona y coautores emplean sensores de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo de una plantación de *Pinus greggii*, y diferenciar los árboles vivos, muertos o con algún nivel de estrés. Dicha innovación posibilita el monitoreo de las plantaciones como una alternativa al análisis visual, realizando varios recorridos y marcando los árboles para su conteo, lo que en muchos casos no es posible por falta de recursos y/o tiempo.

Los trabajos del grupo del Dr. Chávez Valencia de la Universidad de Guanajuato se enfocan en la determinación de la calidad de tabicones, elementos prefabricados en forma de prisma cuadrangular, elaborados de una mezcla de agregados finos y gruesos, y en algunos casos con aditivos que son homogenizados, amasados y comprimidos en talleres casi artesanales. Aquí se analizan propiedades mecánicas, estructurales y controles de calidad, con un aporte importante al proceso de fabricación y sus aplicaciones en la industria de la construcción. Por su parte, Sotomayor Castellanos y colaboradores en su estudio sobre las diferentes propiedades de la madera, encuentran que la resistividad eléctrica varía entre *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. La heterogeneidad y la estructura anatómica contribuyen en la variación entre especies y su utilidad para la elaboración de productos maderables.

Los estudios de flujo en cavidades con tapa móvil se han utilizado en el diseño de sistemas de refrigeración. Pedraza Jiménez y colaboradores presentan la solución numérica al problema de flujo laminar bidimensional en una cavidad con la frontera superior móvil utilizando el software GiD Simulation y Kratos Multiphysics. Los resultados demuestran la eficiencia de esta estrategia para resolver problemas de flujo.

Con este número ***Ciencia Nicolaita*** espera seguir contando con la preferencia de sus lectores y mantiene su espíritu de dar difusión a los avances científicos de actualidad.

José López Bucio
Editor



Modelo experimental de fondo móvil para determinar la evolución de un perfil de playa

Experimental model of a movable bottom to determine the evolution of a beach profile

Karina Griselda Ocaña Espinosa de los Monteros¹, Cindy Casas Valencia¹, Karla Monserrat Virrueta Sánchez²

¹ Investigadoras del Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera, Km12+000 Carretera 431 El Colorado-Galindo, San Fandila, Pedro Escobedo, Querétaro. C.P.76700.

² Alumna de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Carretera Uruapan-Carapan N°5555 La Basilia, Uruapan, Michoacán CP.60015.

Historial

Manuscrito recibido: 27 de noviembre de 2023

Manuscrito aceptado: 25 de septiembre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Karla Monserrat Virrueta Sánchez

e-mail: ic.karlmonserratvirrueta18@itsuruapan.edu.mx

ORCID:

Resumen

En este trabajo se desarrolló un modelo hidráulico en el Instituto Mexicano del Transporte para revisar el efecto de las diferentes características del oleaje en las secciones transversales de playa. Se determinó el cambio en la geometría de un perfil de playa debido al oleaje, analizando los principales efectos e impactos, y se identificó su comportamiento ante las diferentes condiciones de oleaje en relación con las características del sedimento. Se utilizaron diferentes metodologías para realizar pronósticos de evolución de perfiles de playa y se seleccionó uno con base en estudios de campo para construir el modelo hidráulico. Se calculó el retroceso de la línea de playa en el perfil, y con los resultados se realizó un análisis.

Palabras clave: Perfil de playa, modelo fondo móvil, Procesos costeros.

Introducción

Las costas están constituidas por material sólido e intersticial con sustancias como agua y sales contaminantes orgánicas e inorgánicas. Estos materiales están expuestos constantemente al embate del clima marítimo (oleaje, corrientes, y vientos), lo que genera los ambientes costeros (ONU, 2015). El oleaje es la forma más evidente de energía en los océanos, éste depende principalmente de parámetros atmosféricos, morfológicos, e hidrodinámicos, que influyen proporcionalmente en las costas generando una reacción con el transporte de sedimentos, por lo que el conocimiento de estos conceptos es indispensable en este estudio, enfatizando que estas variables

Abstract

In this report, a hydraulic model was developed at the Mexican Transport Institute to review the effect of different wave characteristics on beach cross sections. The change in the geometry of a beach profile due to waves was determined, analyzing the main effects and impacts, and the behavior of the beach profile under different wave conditions in relation to the characteristics of the sediment was assessed. Different methodologies were used to make beach profile evolution forecasts and a beach profile was selected based on field studies to build the hydraulic model. The retreat of the beach line in the profile was calculated, and an analysis was carried out with the results.

Keywords: Evolution beach profile, Physical model, Coastal process.

son importantes para comprender mejor los procesos costeros en los litorales.

Las características y evolución morfológica del perfil de playa, son determinantes para una gestión eficiente de la zona costera (Bernabeu, 2001). El perfil de playa es el fundamento teórico de modelos hidrodinámicos con disipación de oleaje en aguas someras, así como en modelos de corrientes litorales, su relación con el transporte de sedimentos, y la evolución de la línea de playa, como el modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989) y en el perfil de playa el modelo SBEACH (Larson y Kraus, 1989).

La simulación física y numérica del transporte y

corrientes litorales es lo que define la ingeniería de costas. Para realizar el planteamiento se requiere simplificar del sistema el perfil de equilibrio en que se encuentra, tomando en cuenta algunos de los aspectos geológicos, dando mayor importancia a la hidrodinámica.

En el estudio de los procesos costeros, se realiza una simplificación tomando en cuenta de forma independiente, el transporte transversal y longitudinal de sedimentos, lo que permite utilizar y trabajar en dos escenarios morfológicos: la línea de playa en planta y el perfil o sección transversal de playa.

En general todas las secciones transversales de playa tienen una disposición similar, ya que encontramos una pendiente más pronunciada en la zona cercana a la línea de playa y una pendiente más suave conforme nos alejamos de la parte continental. Dicha similitud permite el pronóstico de la evolución del perfil de playa con modelos matemáticos, así como la obtención o aproximación del perfil de equilibrio.

El perfil de equilibrio es la forma de un perfil de playa que se obtiene con modelos numéricos al someterlo a la acción del oleaje (altura de ola y período), y tomando en cuenta que dicho perfil está compuesto con material de un determinado diámetro. El primer supuesto de este concepto es que hay una respuesta al oleaje incidente y a las características sedimentológicas del perfil llegando a una sección que no varía con el tiempo, considerando que el transporte transversal de sedimento promediado en el tiempo es nulo.

De acuerdo a lo anterior, en la realidad no existe un perfil de equilibrio estático ya que el oleaje, la marea y las corrientes varían y cambian en el tiempo, así como el material que conforma dicho perfil; las características de oleaje y sedimentológicas están delimitadas a determinadas condiciones, los cambios en el perfil están limitados; al perfil de playa que se presenta con mayor frecuencia se le considera el perfil de equilibrio dinámico de la playa. Las principales aplicaciones de este concepto son:

1. Impacto de cambios en las variables. Es un instrumento para medir el impacto de los agentes inductores llámense oleaje y corrientes, y su relación con las características sedimentológicas en el perfil de playa y su influencia en la pendiente y forma del perfil.
2. Modelo de predicción. Al establecer dichas relaciones se puede pronosticar el comportamiento de un perfil de playa, lo que permite realizar análisis ante diferentes condiciones de oleaje incidente y de las características del sedimento, su principal utilidad es tomar en cuenta los cambios morfológicos en una

playa tanto cualitativa como cuantitativamente para el análisis del impacto y grado de influencia de los cambios en el oleaje y las corrientes.

Materiales y métodos

Modelo físico de fondo móvil

Con la finalidad de determinar el impacto en los cambios morfológicos en la geometría de los perfiles de playa ante los principales agentes inductores en el cambio de las secciones de playa, se realizó el modelo físico de fondo móvil, para la evolución de los perfiles de playa en el canal de olas del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT (Instituto Mexicano del Transporte).

Con la información del levantamiento de las secciones transversales de playa que se recopilaron de diversos sitios de estudio, se seleccionó un perfil de playa para la construcción del modelo físico (**Figura 1**).

Selección de la escala de líneas

Para realizar la construcción del modelo hidráulico de fondo móvil en el canal de olas del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera es necesario garantizar la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo. De acuerdo a los requerimientos de construcción de éste tipo de modelos hidráulicos, es necesario realizar la distorsión más conveniente con el objeto de visualizar el fenómeno deseado, por lo que se procedió a realizar la selección de las escalas de líneas horizontal y vertical.

La selección de las escalas de líneas con las que se construyó el modelo hidráulico en el canal de olas, se realizó considerando la configuración batimétrica del perfil de playa seleccionado, la relación entre las alturas de ola del prototipo y la capacidad de generación del oleaje de los equipos, el tirante máximo a representar y de las condiciones de oleaje a estudiar en el modelo hidráulico.

Adecuación del canal de olas

Se llevó a cabo la construcción del modelo físico de fondo móvil para determinar la evolución geométrica del

Tabla 1. Escalas de líneas vertical y horizontal seleccionadas para la construcción del modelo físico en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica de Ingeniería de Puertos y Costas.

Escala horizontal (H)	Escala vertical (L)	Proporción
1:120	1:24	1v:5h

FUENTE: IMT (2023).

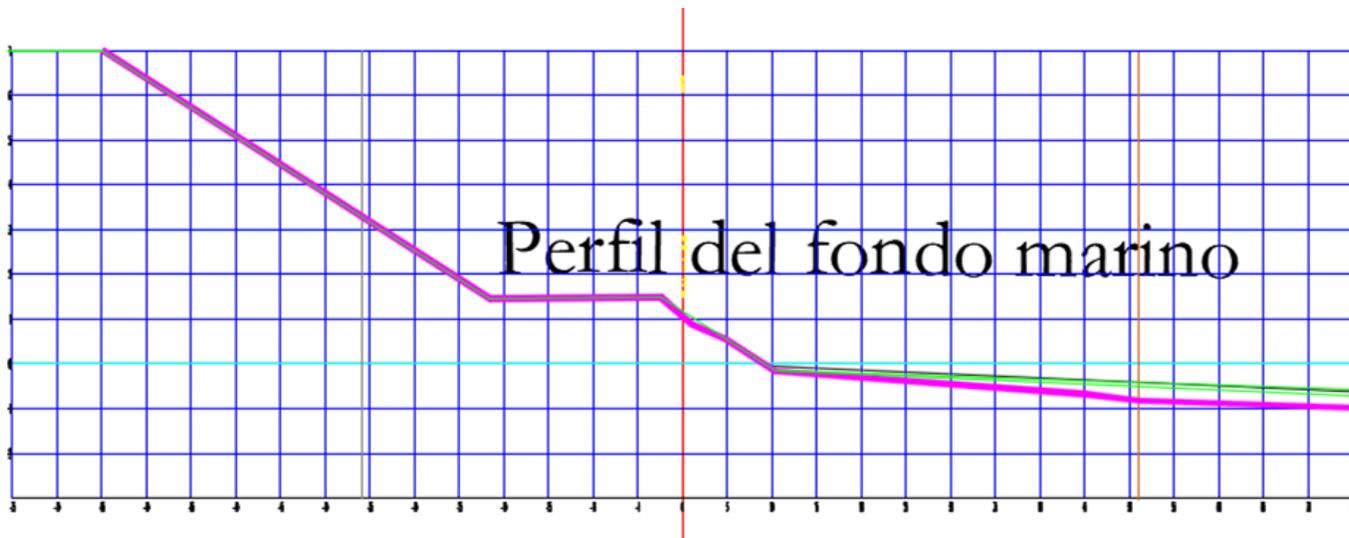


Figura 1. Perfil de playa seleccionado.

perfil de playa, en un canal de olas de 35 m de largo, 4.90 m de ancho y 1.20 m de profundidad que se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT. Para la construcción del modelo físico de fondo móvil, se tomó en consideración las escalas previamente seleccionadas y se realizó la adecuación del canal de olas siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- a) Retiro de la sección existente en el canal de olas (Figuras 2a y 2b).
- b) Trabajos de limpieza (Figura 2c).
- c) Trazo y colocación de un muro de tabique para retener la arena (Figura 2d y 2e).
- d) Trazo del perfil de playa en las ventanas de observación del canal de olas con la configuración batimétrica y topográfica de dicha sección (Figura 2f).
- e) Colocación, trazado y nivelación de las varillas para la configuración del perfil en el interior del canal de olas (Figuras 2g y 2h).
- f) Relleno y colocación a base de arena hasta los niveles indicados, para la configuración de la sección de playa (Figuras 2i y 2j).

Programa de ensayo

La programación de los ensayos en el modelo físico, se realizó con los resultados obtenidos en las modelaciones numéricas de la refracción del oleaje normal y extremal, donde se obtuvieron las diferentes alturas y periodos de ola del oleaje que incide en la zona de estudio para cada uno de los niveles de agua seleccionados, tal como se muestra en la **Tabla 2**.

Desarrollo experimental

Los ensayos en modelo físico, se realizaron en el canal de olas del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT a las escalas ya indicadas. Dichos ensayos se realizaron con oleaje irregular y en los extremos del canal de olas se colocaron taludes absorbentes para amortiguar el efecto de la reflexión del oleaje, cabe mencionar que el generador de oleaje cuenta con un sistema de absorción de oleaje que evita su reflexión.

Para la operación del modelo hidráulico, se utilizó una computadora PC en la cual se genera un archivo de señales digitales de oleaje irregular basadas en el espectro BRETSCHEIDER-MITSUYASU, estos datos se convierten a datos analógicos (variaciones de voltaje) y se envían a un generador de oleaje tipo pistón, como se

Tabla 2. Programa de ensayos.

Nivel (m)	Escala Horizontal [Ex]	Escala Vertical [Ey]	H (m)	T (s)	Duración (h)	Ensayo
0.00	1:120	1:24	1	6.39	12	1
			2	6.39	12	2
			1	8.60	12	3
			2	8.60	12	4
			1	11.01	12	5
			2	11.01	12	6

FUENTE: IMT (2023).



Figura 2. Adecuación del canal de olas.

indica en la **Figura 3**.

Para la medición de la altura de ola del modelo hidráulico, se utilizaron 2 sensores de oleaje tipo resistivo de ± 5 volts de resolución, colocados a una distancia de 1.5 veces la longitud de la ola frente al perfil de playa, esto con objeto de medir la altura de ola incidente. Adicionalmente, se colocaron 2 sensores de tipo capacitivo colocados en la orilla de playa del perfil playero, con la finalidad de medir las alturas de ola incidentes en esa zona (**Figura 4**).

Los ensayos en modelo físico de la evolución de los perfiles de playa se realizaron tomando en consideración las mismas alturas y periodos de ola que se indicaron en el programa de ensayos.

Ensayos en modelo hidráulico de la evolución en el perfil de playa

Con objeto de determinar el cambio en el perfil de playa sujeto a las condiciones de oleaje previamente establecidas en los programas de ensayo, se llevaron a cabo las pruebas en modelo físico con la siguiente metodología:

1. Se representó en el modelo físico, el perfil de playa seleccionado, dejando el trazo de dicho perfil en las ventanas de observación del canal de olas con el objeto de tener identificada la línea original y poder tomar las mediciones del cambio que sufrió dicho perfil después de ser sometido al oleaje.
2. Se seleccionaron los puntos de referencia que se



Figura 3. Equipo utilizado para la generación, medición y análisis de oleaje.



Figura 4. Sensores de medición de oleaje colocados durante los ensayos en modelo físico para el registro de las alturas de ola generadas.

- midieron durante el desarrollo de los ensayos en el modelo físico para evaluar y comparar el cambio en la sección de playa (**Figura 5**).
3. Se dio inicio con el nivel del mar (valor = 0) con el primer periodo de la ola, sometiendo al perfil de playa a las alturas de ola de 1 m y 2 m (prototipo) durante 12 horas cada una con la finalidad de completar las 24 horas (prototipo).
 4. Se realizaron mediciones en los puntos de referencia seleccionados (**Figura 5**) cada 4 horas hasta completar las 24 horas (prototipo).
 5. Posteriormente, al finalizar el lapso de 24 horas se reconstruyó el perfil de playa y se sometió nuevamente a las alturas de ola (1 m y 2 m prototipo), esta vez con el siguiente periodo de ola y así sucesivamente para todos los periodos de ola seleccionados.

Resultados

En el canal de olas ancho del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT, se realizaron los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa con el nivel del mar 0 m, referido al Nivel de Bajamar Media (NBM). Dichos ensayos consistieron en someter la sección de playa durante 24 horas (prototipo) a las alturas de ola [H] de 1 m y 2 m (12 horas cada una) considerando cada uno de los periodos [T] establecidos (6.39 s, 8.6 s y 11.01 s) (**Tabla 3**).

En este apartado, se mostrarán las gráficas con los cambios que sufrió el perfil de playa en el modelo físico, al ser sometido a las condiciones de oleaje indicadas, así como las evidencias fotográficas que muestran dichos cambios.

Ensayos en modelo físico con nivel del mar 0 m y periodo [T] de 6.39 segundos

En la **Figura 6** se muestran los resultados obtenidos

Tabla 3. Ensayos en el modelo físico del cambio del perfil de playa con nivel del mar de 0 m.

Período [T] (seg)	Altura de ola [H] (m)	Duración (h)
6.39	1 m	4
	1 m	8
	1 m	12
	2 m	16
	2 m	20
	2 m	24
8.6	1 m	4
	1 m	8
	1 m	12
	2 m	16
	2 m	20
	2 m	24
11.01	1 m	4
	1 m	8
	1 m	12
	2 m	16
	2 m	20
	2 m	24
	2 m	28
	2 m	32
2 m	36	

FUENTE: IMT (2023).



Figura 5. Puntos de control para las mediciones de los cambios del perfil de playa del modelo físico.

de los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control para el periodo de 6.39 s con nivel del mar 0 m, donde se puede observar el perfil inicial antes de ser sometido al oleaje (Figura 6a) y el perfil de playa a las 24 de horas de ser sometida a las condiciones de oleaje 12 horas con $H = 1$ m y 12 horas con $H = 2$ m y $T = 6.39$ s (Figura 6b).

Ensayos en modelo físico con nivel del mar 0 m y periodo [T] de 8.6 segundos

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control para el periodo de 8.6 s con nivel del mar 0 m, donde se puede observar perfil de playa a las 24 de horas de ser sometida a las condiciones

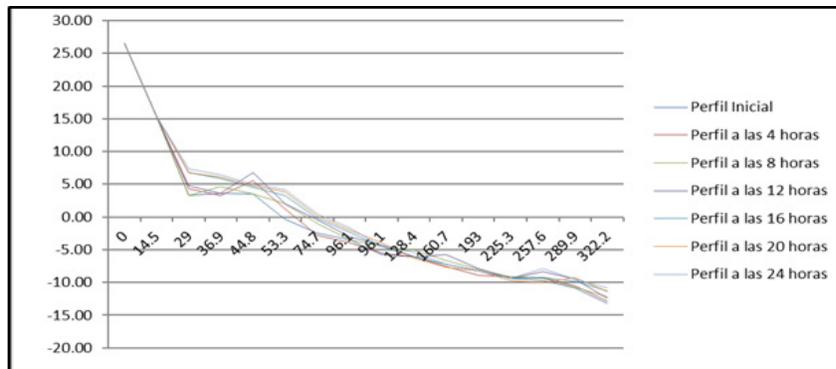


Figura 6. Resultados cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control, con nivel del mar 0 m y periodo de 6.39 s.

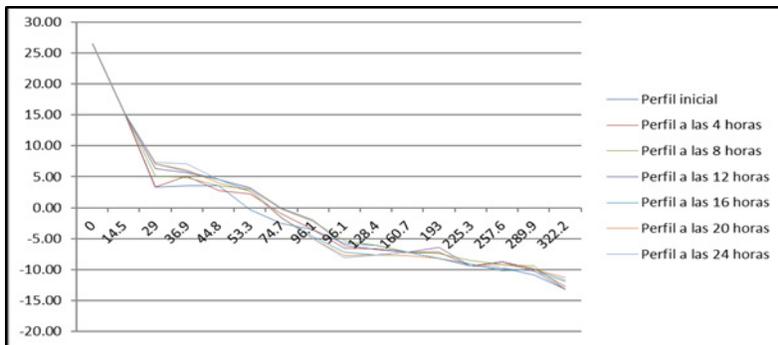


Figura 7. Resultados cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control, con nivel del mar 0 m y periodo de 8.6 s.

Tabla 4. Diferencias entre el perfil inicial y el obtenido para una altura de 1 m a las 12 h de duración.

Punto	Periodos (T)		
	6.39 s	8.60 s	11.01 s
1	0.00	0.00	0.00
3	+1.50	+3.00	+3.00
5	+3.30	+1.00	+4.50
6	+2.30	+3.50	+3.20
9	+1.50	-0.30	-1.40
10 a 12	0.00	0.00	0.00

FUENTE: IMT (2023).

de oleaje 12 horas con $H = 1$ m y 12 horas con $H = 2$ m y $T = 8.6$ s.

Ensayos en modelo físico con nivel del mar 0 m y período [T] de 11.01 segundos

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos en los puntos de control de los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa para el periodo de 11.01 s. Cabe señalar que, durante la realización de los ensayos en el modelo físico, se observó que el perfil de playa continuaba sufriendo modificaciones después de las 24 h, el cual se probó hasta 36 h donde se estabilizó.

Discusión

Como se puede observar en las gráficas mostradas en

Tabla 5. Diferencias entre el perfil inicial y el obtenido para una altura de 2 m a las 24 h de duración.

Punto	Periodos (T)		
	6.39 s	8.60 s	11.01 s
1	0.00	0.00	0.00
3	+4.00	+4.00	+4.80
5	+1.50	+1.00	+1.40
6	+4.50	+3.40	+4.00
9	+1.30	-2.70	-1.30
10 a 12	0.00	0.00	0.00

FUENTE: IMT (2023).

las Figuras 6, 7 y 8, las secciones tienen una variación con respecto al perfil de playa inicial, las diferencias se revisaron en los puntos 1, 3, 5, 6, 9 y de 10 a 12, para determinar el grado de impacto en la sección transversal, a continuación, se muestran las diferencias obtenidas para una altura de ola de 1 m a las 12 h de duración y para una altura de ola de 2 m para 24 h de duración (Tablas 4 y 5).

Se puede observar la relación que existe entre los diferentes periodos y alturas de oleaje en la geometría del perfil de playa y su variación, se observa también que, de acuerdo con la literatura, a mayor periodo, mayor es el cambio, también se observa que después de los puntos 10 a 12, ya no tienen efecto la altura y el periodo del oleaje en la pendiente del fondo.

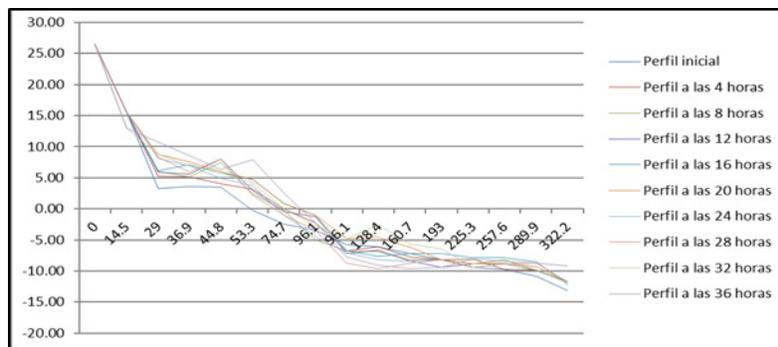


Figura 8. Resultados cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control, con nivel del mar 0 m y periodo de 11.01 s.

Conclusiones

El modelo de fondo móvil para determinar la evolución de un perfil de playa sirvió para representar físicamente la relación que existe entre la altura y periodo del oleaje con las características de los sedimentos que conforman una playa y la variabilidad en su geometría de acuerdo a estas características, también se observó que existe un punto en la sección donde estas variables ya no tienen un efecto en la pendiente, se observó también la formación de rizos en el fondo, los cuales también tienen un patrón relacionado con la distancia y la profundidad de la sección y con el inicio de movimiento del sedimento, cabe señalar que este efecto sólo se estudió tomando en cuenta el nivel medio del mar, lo que lleva a proponer como una línea de investigación, el realizar el estudio para diferentes niveles del mar y estudiar la influencia de esta variable en la geometría de un perfil de playa.

Agradecimientos

A Karla Virrueta Sánchez por su valiosa participación en este estudio, al Instituto Mexicano del Transporte, que fomenta la investigación de temas portuarios y costeros y hace posible el desarrollo del estudio en sus instalaciones y con ello del presente artículo.

Referencias

Bernabeu AM, Medina R, Vidal C, Muñoz-Pérez JJ (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de

equilibrio en dos tramos. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 14(3-4).

Alexandra T, Inigo J, Paula C (2016). Managing coastal erosion under climate change at regional scale, *Coastal Engineering*, US.

Bruun P (1988). The Bruun rule of erosion by sea-level rise: A discussion on large-scale two and three dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, USA.

Chatenoux B, Peduzzi P, Velegrakis V (2012). RIVAMP training on the role of coastal and marine ecosystems for mitigating beach erosion: The case of Negril Jamaica, UNEP/GRID-Geneva, Geneva, Switzerland.

Larson M, Kraus NC (1998). SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, USA Army Corps of Engineers, USA.

Marcel J, Huib J (1995). Modelling shoreface profile evolution. *International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics*, USA.

Dean RG (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, USA.

Tsanakas K, Poulos SE, Monioudi I (2017). Sea level rise impact in the beach zone of Katerini región NW Aegean Sea, 15th International Conference on Environmental Science and Technology, US.



Validación de la estimación de flujos subterráneos para la zona de La Mintzita mediante el uso de mapas PGR y la modelación hidrológica en WEAP

Validation of the estimation of groundwater flows for The Mintzita zone through the use of PGR maps and hydrological modeling in WEAP

Heidy Janette Alcantar Mondragon, Sonia Tatiana Sánchez Quispe , Julio César Orantes Ávalos, María del Mar Navarro Farfán* 

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria C.P.58030, Morelia Michoacán, México.

Historial

Manuscrito recibido: 5 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 25 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

María del Mar Navarro Farfán

e-mail: maria.navarro@umich.mx

ORCID: 0000-0002-8423-3092

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo identificar zonas potenciales de recarga para el manantial La Mintzita en el estado de Michoacán, que es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad de Morelia. En los últimos años su volumen se ha reducido en un 68% y con ello se vuelve imperativo preservar el recurso existente. Se realiza un modelo de escurrimiento con el software WEAP, con lo que se define la infiltración en la zona y, por medio de álgebra cartográfica se determinan los sitios con potenciales zonas de recarga (PGR) y se superpone información de parámetros físicos y químicos.

Palabras clave: Potenciales zonas de recarga, calidad del agua, modelación.

Abstract

The purpose of this study is to identify potential recharge areas for La Mintzita spring in the state of Michoacán, which is one of the main sources of water supply for the city of Morelia. In recent years its volume has been reduced by 68%, making it imperative to preserve the existing resource. A runoff model is made with WEAP software, with which infiltration in the area is defined and by means of cartographic algebra, the sites with potential recharge zones (PGR) are determined and information on physical and chemical parameters is superimposed.

Keywords: Potential groundwater recharge, water quality, modeling.

Introducción

El manantial La Mintzita en Michoacán, México, provee del 40% al 50% del agua que se consume en la zona metropolitana de Morelia (Secretaría de Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, 2012). El manantial fue declarado sitio RAMSAR (humedal designado de importancia internacional por la Convención sobre los Humedales, establecida por la UNESCO) en 2009 por albergar especies endémicas incluyendo especies en peligro de extinción (Marín Togo, 2009).

El agua subterránea juega un papel importante en el crecimiento socioeconómico del país, debido a sus características físicas que permiten utilizarla de manera versátil, funcionando como presas de almacenamiento,

siendo posible extraer agua en cualquier época del año desde prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero (CONAGUA, 2018). Es sabido que en la mayor parte de México el agua subterránea es un recurso ignorado o poco conocido, en otras es mal administrado y sólo en algunas partes del país se le da un uso racional.

El volumen del manantial se ha reducido en un 68% en los últimos 30 años debido a diversos factores antropogénicos como la industrialización, el cambio de uso del suelo, la excesiva expansión urbana y los incendios forestales en el Cerro del Águila, ya que es una de las principales fuentes de recarga. La capacidad de infiltración depende de las interacciones que pueden ocurrir entre el tipo de suelo, la formación geológica

existente, el tipo de vegetación, la topografía y el régimen de lluvias, ya que favorecen o perjudican la recarga del acuífero.

Entre los factores que determinan la recarga hídrica se encuentran el clima, la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración (Bardales Espinoza, 2010), los cuales permiten la creación de modelo precipitación-escorrimento que es importante para validar el flujo superficial y tener un panorama extenso de su comportamiento y posible relación con el transporte de contaminantes, además de proporcionar información para la elaboración de mapas temáticos (Souza, 2019).

El área de estudio se compone de dos clases hidrogeológicas, clasificadas por su permeabilidad, siendo significativamente importantes para identificar y determinar las zonas potenciales de recarga de agua subterránea del área de estudio, estas tienen una infiltración directa a los acuíferos (CONAFOR, 2018), las cuales son:

- La unidad de permeabilidad media a alta: que tiene una edad geológica que data del Terciario continental y Cenozoico superior e inferior, constituida principalmente por areniscas y conglomerados.
- La unidad de permeabilidad baja a media: que tiene una edad geológica que se remonta al Cenozoico

medio, y está constituida principalmente por rocas volcánicas poco fracturadas, material limo-arcilloso y tobas líticas de baja permeabilidad.

La geología, la cubierta del suelo, las precipitaciones y las redes de drenaje de la zona pueden tener consecuencias sobre los parámetros fisicoquímicos del agua y, en consecuencia, sobre su calidad. Uno de los parámetros físicos más importantes es la temperatura, que es una propiedad termodinámica que influye significativamente en muchas de las características físicas, químicas y biológicas de las masas de agua, desempeñando un papel importante en la autodepuración de los residuos orgánicos, afectando simultáneamente a la velocidad de estabilización de la materia orgánica, al nivel de saturación del oxígeno disuelto y a la velocidad de aireación. Cuando aumenta la temperatura, las moléculas de agua tienden a separarse en sus elementos hidrógeno y oxígeno.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio (**Figura 1**) que corresponde a las zonas aledañas entre el Manantial de La Mintzita y el Cerro del Águila se delimitó con base en la recopilación

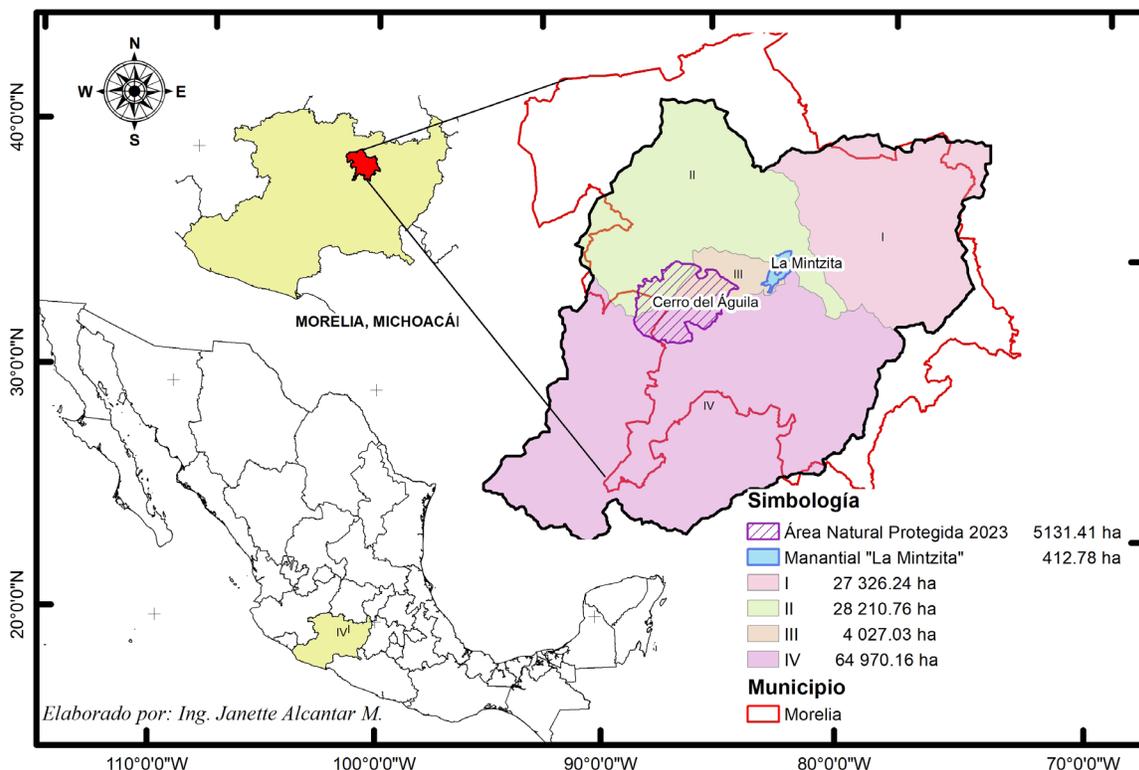


Figura 1. Mapa de localización, Morelia, Michoacán.

y procesamiento de información climática, hidrométrica y geológica, ya que las características geológicas y edafológicas de la zona permiten la infiltración y recarga de agua subterránea, creando un sistema hidrológico que abastece los manantiales y pozos profundos que se localizan en las partes bajas y que son aprovechados para satisfacer las necesidades de agua (Bahena Fraga, 2010).

Datos hidrometeorológicos

Para realizar las modelaciones se realizó un tratamiento a las estaciones climáticas e hidrométricas (**Figura 2**); dicho tratamiento permite validar las estaciones para su aplicación en la modelación (Navarro- Farfán *et al.*, 2024a). El llenado de datos de precipitación con el método de *Inverse Distance Weighted* (IDW) (Sánchez-Quispe *et al.*, 2021) implicó la revisión de las estaciones para obtener series de simulación y junto con los mapas de uso de suelo y tipo de suelo se generó un modelo de precipitación-escorrentía. Finalmente, con ayuda de un software (WEAP) (Stockholm Environment Institute, 2009) se obtuvo el balance hídrico, generando así la delimitación del área de estudio, representada con una microcuenca general.

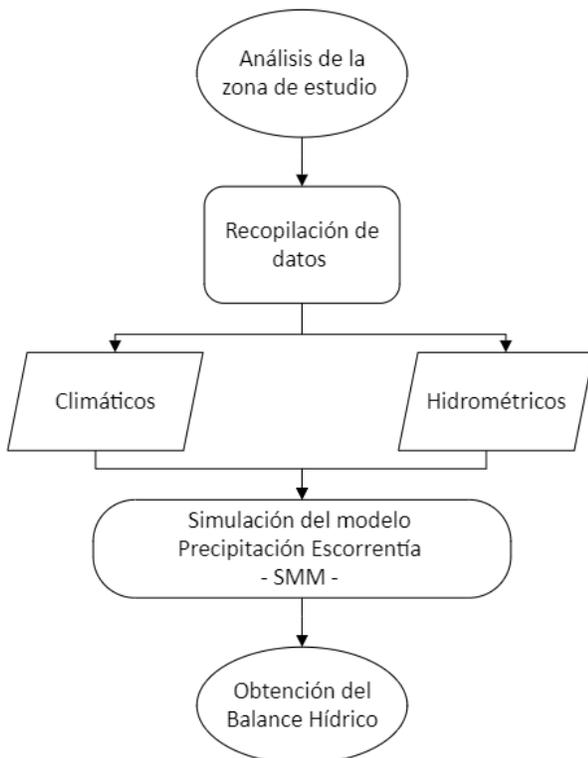


Figura 2. Esquema metodológico precipitación-escorrentía.

Modelación superficial con WEAP

Para el modelado físico, se deben tener en cuenta dos subprocesos esenciales: la transformación de la precipitación-escorrentía y el canal de enrutamiento. Estos modelos hidrológicos proporcionan resultados de escorrentía de una cuenca, que pueden representarse tanto mensuales como anuales que son comparados con los volúmenes circulantes registrados en una estación hidrométrica (Aller *et al.*, 1987).

Para el presente estudio, se utilizó el software WEAP (*Water Evaluation and Planning System*), a través del *Soil Moisture Method* (SMM), el cual permite calcular las recargas que se tendrán en el acuífero, a través de recarga profunda.

Este método se considera como el más complejo presente en WEAP, ya que representa la cuenca como dos tanques de suelo, así como el potencial de acumulación de nieve. En la capa superior del suelo, simula la evapotranspiración considerando las precipitaciones y el riego en tierras agrícolas y no agrícolas, la escorrentía y el flujo subsuperficial y los cambios en la humedad del suelo (Navarro Farfán *et al.*, 2024b). En la **Tabla 1** se muestran las variables a utilizar en las ecuaciones que definen el *Soil Moisture Method*.

El modelo matemático del método de la humedad del suelo es un balance de agua entre entradas y salidas; en donde la diferencia entre entradas y salidas en cada uno de los dos tanques representa los cambios en la humedad en la zona de raíces y en la zona profunda, respectiva-

Tabla 1. Valores asignados para cada capa temática y sus factores de influencia.

R	Recarga
Rd	Almacenamiento efectivo
Pe	Precipitación que escurre
PET	Evapotranspiración potencial
Kc	Coefficiente de cultivo
z1	Almacenamiento relativo en el tanque 1
RRF	Factor de resistencia al escurrimiento
f	Coefficiente de partición
Ks	Conductividad saturada
P	Precipitación
A	Área
Smax	Percolación profunda
z2	Almacenamiento relativo en el tanque 2

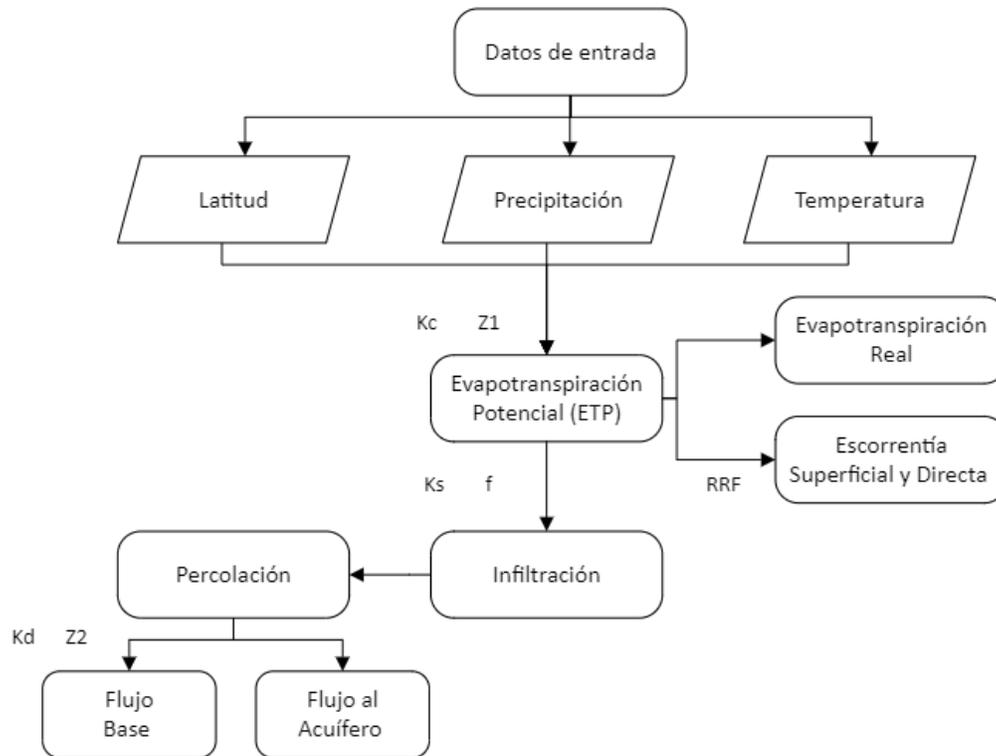


Figura 3. Esquema del funcionamiento del método de la humedad del suelo.

mente. En la **Figura 3** se muestra el esquema del funcionamiento del método, adaptado del esquema de la guía de modelación para WEAP (Stockholm Environment Institute, 2009).

La calibración se realiza de forma manual, que consiste en un proceso iterativo de prueba y error y cada vez que los parámetros del modelo son ajustados, se compara por medio de indicadores de bondad de ajuste (Moriassi *et al.*, 2007) y visualmente los resultados del modelo con los datos de las aportaciones históricas. Es importante considerar que es muy sensible con los siguientes parámetros:

- K_c (Crop Coefficient), afectando a la evapotranspiración real.
- S_w (Soil Water Capacity), la cual modifica la infiltración y el escurrimiento.
- RRF (Runoff Resistance Factor), que se encuentra ligado a la escurrimiento superficial y escurrimiento directa.
- K_s (Root Zone Conductivity), que se encarga de proporcionar la infiltración en el sistema.

Mapas PGR

Los mapas temáticos de entrada describirán el

comportamiento y la influencia de las diferentes características de cada capa temática sobre las zonas de recarga potencial de agua subterránea dentro del área de estudio. Para realizar los mapas temáticos y obtener un mapa de zonas de recarga potencial (*Potential Groundwater Recharge* o PGR) (Souza, 2019), es necesario conocer varios aspectos, principalmente la ubicación y delimitación del área en estudio y la precipitación, ya que es la fuente primaria de agua en la superficie terrestre (Aparicio Mijares, 2015), sus mediciones forman el punto de partida de la mayoría de los estudios referentes a la gestión integrada del agua (Lara Vásquez, 2021).

En la **Figura 4** se muestra el esquema metodológico para la elaboración del mapa PGR, una vez calculado el factor de influencia por cada capa temática.

El análisis de las zonas potenciales de recarga de agua subterránea en el área de estudio consistió en varios pasos, como la obtención de la información vectorial oficial del manantial La Mintzita, la construcción de bases de datos georreferenciadas y la elaboración de capas temáticas con diferentes factores de influencia en el área de estudio. La elaboración de estas capas se realizó mediante geoprocesamiento en un Sistema de

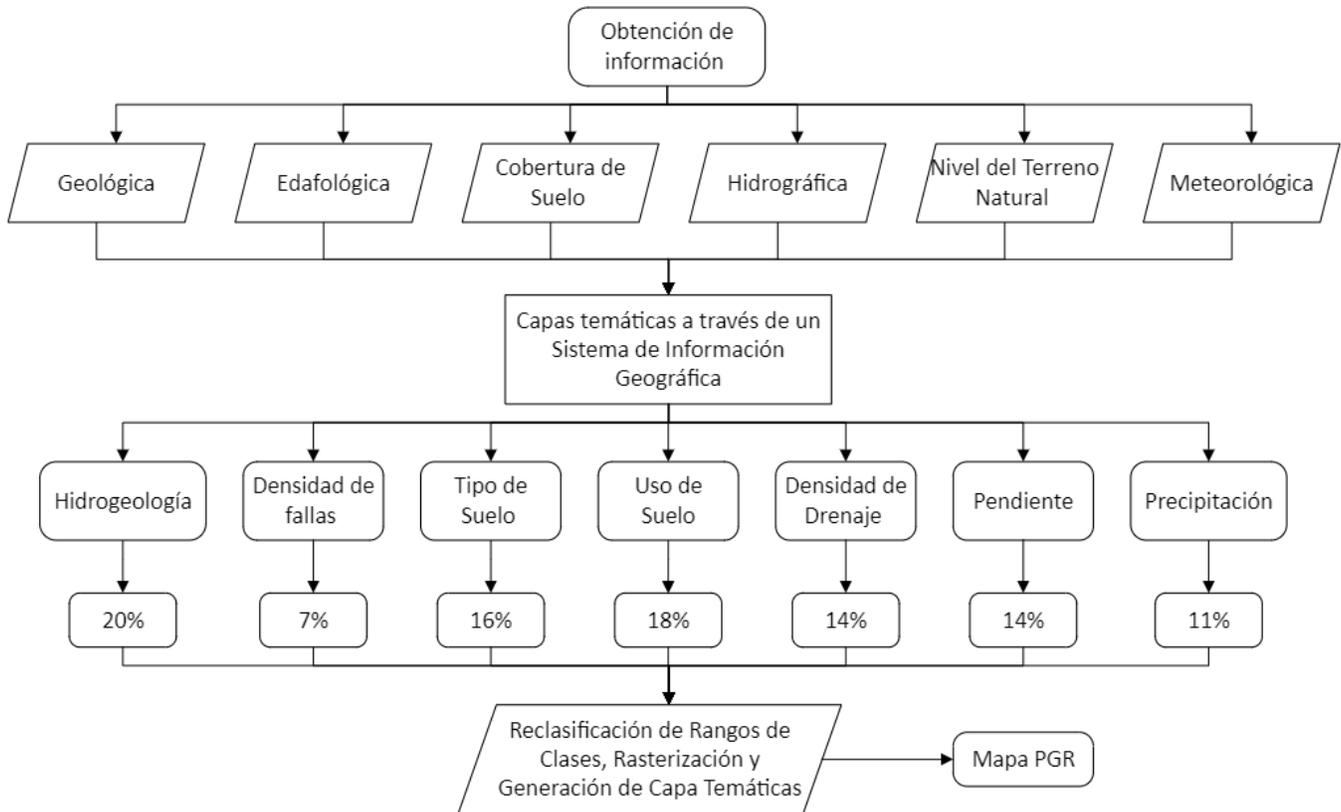


Figura 4. Esquema metodológico para mapas PGR.

Información Geográfica (SIG) utilizando la proyección UTM, zona 14 Norte, Datum WGS84. Las capas temáticas consideradas fueron: hidrogeología, uso del suelo, tipo de suelo, pendiente, densidad de drenaje, precipitación y densidad de fallas geológicas (Hernández Juárez *et al.*, 2020).

Para evaluar la influencia de cada capa, se procedió a evaluar el puntaje porcentual de influencia de cada capa temática, este se derivó de la interrelación entre todos los factores, se asignó un valor de 2 para la influencia mayor y un valor de 1 para la influencia menor, como se muestra en la **Tabla 2**, por lo que la puntuación de cada factor (PF) resulta de la suma de las influencias que tiene cada capa.

Para el cálculo del Factor de Influencia (FI), se divide el puntaje de cada factor (PF) entre la suma de todos los factores ($\sum PF$) multiplicado por 100 (Bardales Espinoza, 2010), con esto se calcula la influencia de cada capa temática, en la cual el número más alto representará la mayor influencia en la zona de recarga de agua subterránea, mientras que, un valor bajo connotaría una menor influencia de recarga de agua subterránea.

En donde: T es el tipo de suelo, F representa la densidad de fallas, D es la densidad de drenaje, S corresponde a la pendiente, L es el uso de suelo, H define a la hidrogeología y, R corresponde a la precipitación.

Las capas vectoriales de entrada se rasterizan para redimensionar las celdas a un tamaño de 10, 50 para re-proyectar las capas de entrada. Las capas se reclasifican de modo que cada clase tenga una escala de 1 a 7 (demasiado baja a muy alta). Una vez reclasificados los mapas temáticos, se genera un mapa compuesto utilizando la combinación geométrica y las clases de las 7 capas temáticas de entrada, mostrando las zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas en el área de estudio. La herramienta superpone múltiples capas ráster que representan las diferentes capas temáticas, en esto se genera una ecuación simple en la que se considera la suma de productos del factor de influencia de cada capa multiplicado por la clasificación dada a cada clase como se ve en la Ecuación [1] (Chamorro Mishell, 2016).

$$Re = 0.20H + 0.18L + 0.16T + 0.14S + 0.14D + 0.11R + 0.07F \tag{1}$$

Tabla 2. Valores asignados para cada capa temática y sus factores de influencia.

Capa temática	Alto valor de influencia =2	Bajo valor de influencia =1	PF (alto +bajo)	FI (Pf/∑Pf)*100
Hidrogeología	T+F+L	S+D+R	9.0	20
Uso de suelo	T+H+D	R+S	8.0	18
Tipo de suelo	L+H+D	S	7.0	16
Pendiente	D+H	R+T	6.0	14
Densidad de drenaje	S+R	F+L	6.0	14
Precipitación	D	H+T+S	5.0	11
Densidad de fallas	T	H	3.0	7
		∑=	44	100

Donde los parámetros H es Hidrogeología, L es Uso del Suelo, T es Tipo de Suelo, S es Pendiente, D es Densidad de Drenaje, R es precipitación y F es Densidad de Falla. Este enfoque mixto se utilizó en el análisis de superposición ponderada, esto se hace con los parámetros físico-químicos analizados, de los cuales, la temperatura y los nitratos se superpusieron con el mapa final del potencial de recarga de aguas subterráneas para identificar cómo influyen las interacciones.

Las mediciones de temperatura deben realizarse en el lugar donde se encuentra el agua, y el resultado debe expresarse en grados Celsius (°C). Temperaturas elevadas indican actividad biológica, química y física en el agua, lo que influye en los tratamientos y suministros de agua (Jiménez Morales, 2011).

La toma de muestras *in situ* se realizó en lugares próximos al manantial de La Mintzita. Previamente, una vez que se tuvo el área de estudio, se realizó una visita de campo en conjunto con vecinos de la zona, que ayudaron a identificar los puntos estratégicos alrededor del manantial y de la zona en sí. Una vez que se conocieron las áreas, se propusieron los puntos de captación de agua subterránea, la medición de los parámetros físico-químicos se realiza con la ayuda de un multiparámetro Hanna, modelo HI 98194, para posteriormente enviarlos al laboratorio para el análisis e interpretación de los datos, relacionándolos con las zonas potenciales de recarga.

Resultados

Para alimentar el software WEAP y realizar el balance hídrico, se cargan los archivos vectoriales de la cuenca y ríos generados anteriormente, una vez ingresados los datos, se calculan las áreas de uso de suelo en kilómetros

cuadrados dentro de la cuenca de la estación hidrométrica, los datos obtenidos se muestran en la **Tabla 3**.

Posterior a esto se ingresan de manera manual las áreas; se procede a ingresar el punto de salida de la cuenca y el río principal, realizando conexiones de cuenca a río y de cuenca a acuífero como se muestra en la **Figura 5** para realizar el cálculo del balance. Se realiza el traslado de parámetros calibrados obtenidos con la estación hidrométrica a las cuatro subcuencas y se hacen las simulaciones de escurrimiento superficial, evapotranspiración, infiltración y precipitación.

Las líneas en color azul representan los trazos de los ríos principales de cada subcuenca, las cuales están delimitadas por líneas grises, los puntos verdes representan las conexiones de la cuenca, punto de salida y cuenca a río, esto se realiza para cada subcuenca, se procede a la simulación obteniendo así los escurrimientos observados con el SMM, los valores que se obtiene para el balance hídrico ya en hm³.

En la **Figura 6** se observan los procesos hídricos de las cuencas, la precipitación en las cuencas WSI y WSII son muy similares debido principalmente a que sus áreas son prácticamente iguales, la WSIV es la que recibe mayores aportaciones; además se observa que el

Tabla 3. Áreas de uso de suelo de la estación hidrométrica de Santiago Undameo para calibrar el modelo.

Uso de suelo	Área	Unidad
Agrícola	301.60	km ²
Bosque	254.57	km ²
Pastizal	50.60	km ²
Suelo desnudo	0.38	km ²
Zona urbana	11.66	km ²

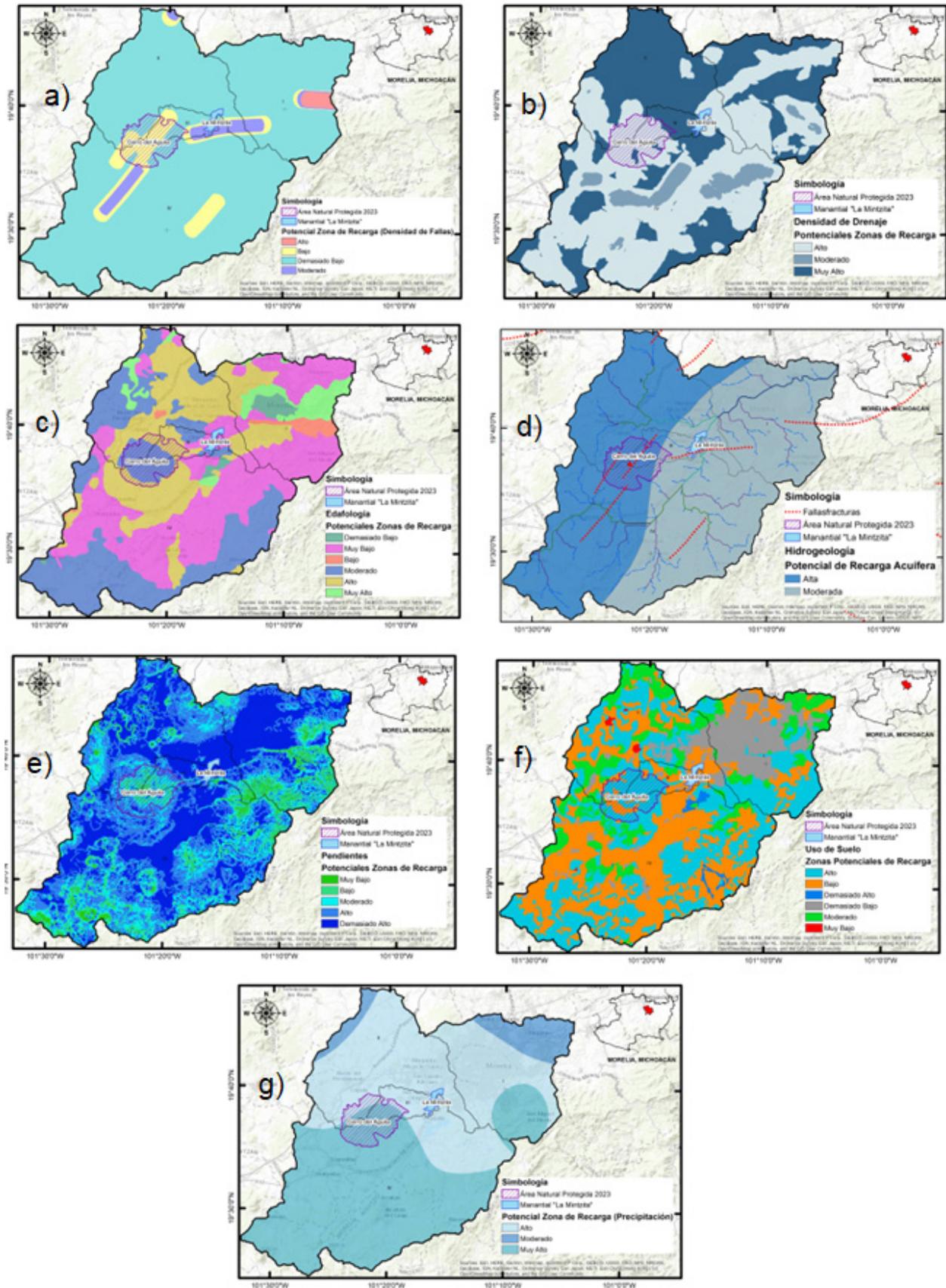


Figura 7. Mapa densidad de fallas.

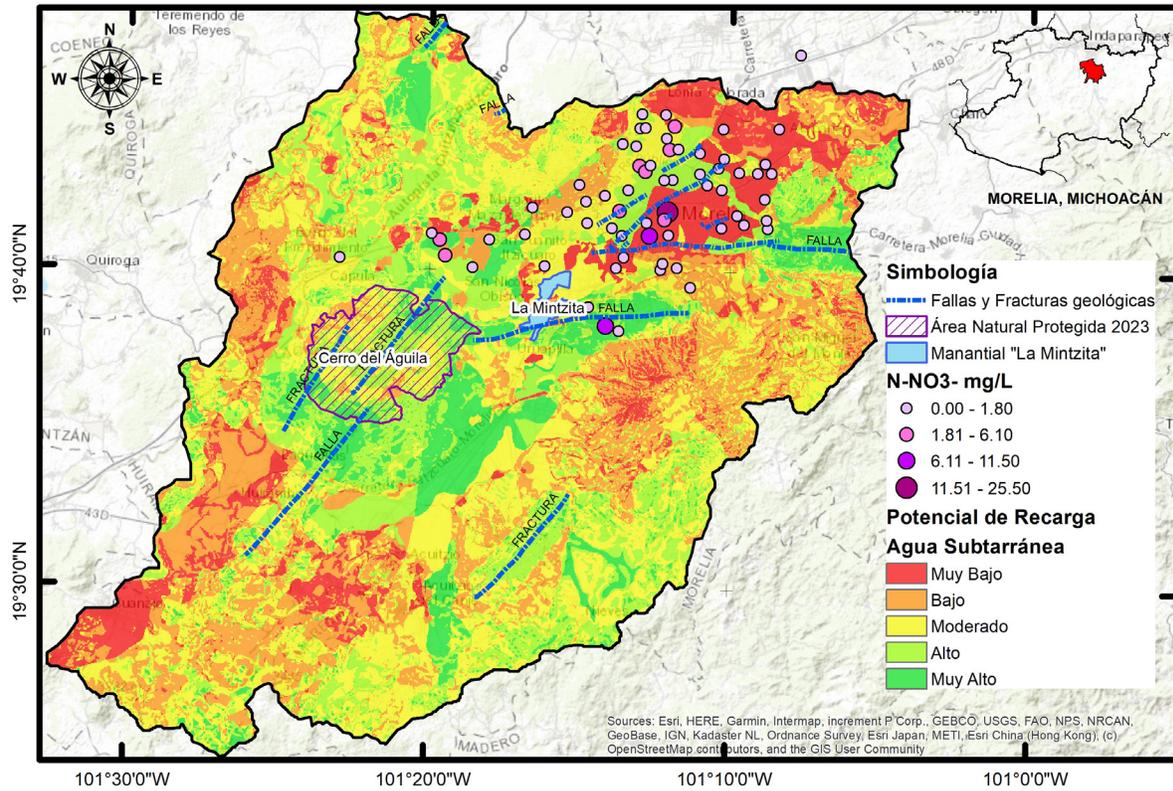


Figura 8. Mapa de zonas potenciales de recarga y pozos con concentraciones de nitratos en la ciudad de Morelia.

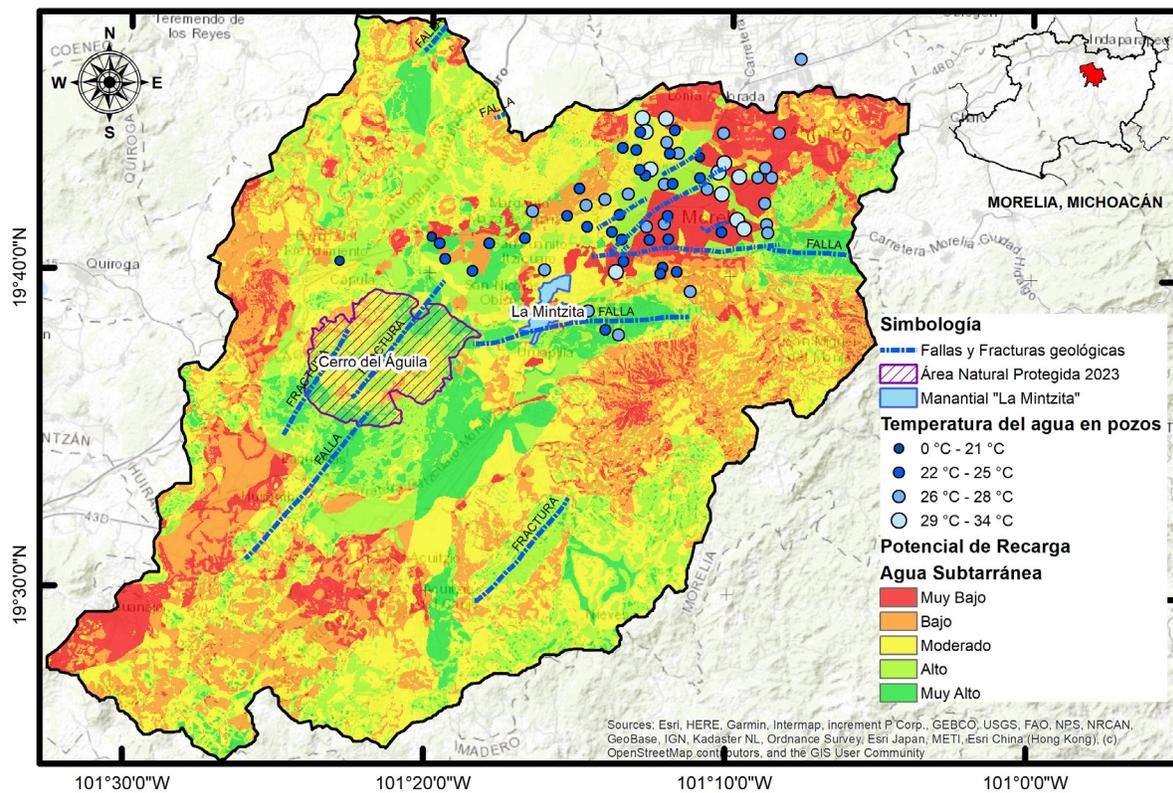


Figura 9. Mapa de zonas potenciales de recarga y valores de temperatura del agua en pozos de la ciudad de Morelia.

proviene de flujos subterráneos, ya que está en una zona de baja infiltración.

Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado que una combinación de datos hidrológicos, topográficos, climatológicos y geológicos puede determinar la eficacia de un área como zona potencial de recarga, lo que es importante comprender para una gestión adecuada de los recursos hídricos. Las áreas designadas como buenas zonas de recarga (valores superiores a 5 en el mapa PGR) se recomiendan para estructuras artificiales alternativas para mejorar la recarga de las aguas subterráneas. De acuerdo con los mapas temáticos de parámetros medidos en campo y laboratorio, se puede tener un análisis más completo de la relación entre el agua y sus fuentes contaminantes. No se identificó una relación de las fuentes contaminantes con las zonas de recarga, pero sí la dirección del flujo, que, junto con las fallas geológicas en la zona demuestra que los plaguicidas y fertilizantes utilizados en las zonas altas del cerro se filtran, generando el proceso de lixiviación, causando la contaminación del acuífero.

Agradecimientos

Al Consejo de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por su apoyo para la realización de este proyecto.

Referencias

Aller L, Hackett G, Thornhill J (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground ater pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association: Dublin, Ohio.

Bardales Espinoza WA (2010). Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica naturales en las cuencas de Guatemala. pp 1-10.

Chamorro Mishell RO (2016). Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos de La Carbonería, Guarazapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra.

CONAGUA (2018). Estadísticas del Agua en México.

Diario Oficial de la Federación (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

Hernández Juárez RA, Manuel L, Rivera M, Peñuela-arévalo LA (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio.

Lara-Vásconez NX, Cushquicullma-Colcha DF, Guaiña-Yungán JI, Espinoza VM, Ati-Cutiupala GM (2021). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio. *Polo del Conocimiento* 6(6):122-148. doi:10.23857/pc.v6i6.2745.

Marín Togo MC (2009). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR).

Moriassi DN, Wilson BN, Douglas-Mankin KR, Arnold JG, Gowda PH (2012). Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4):1241-1247. doi:10.13031/2013.42265

Navarro-Farfán M del M, García-Romero L, Martínez-Cinco MA, Domínguez-Sánchez C, Sánchez-Quispe ST (2024b). Methodology for the assessment of poor-data water resources. *PeerJ* 12:e17755. doi:10.7717/peerj.17755

Navarro-Farfán M del M, García-Romero L, Martínez-Cinco MA, Hernández-Hernández MA, Sánchez-Quispe ST (2024a). Comparison between MODFLOW groundwater modeling with traditional and distributed recharge. *Hydrology* 11(1):9. doi:10.3390/hydrology11010009

Sánchez-Quispe ST, Navarro-Farfán M del M, García-Romero L (2021). Methodology for the processing of meteorological and hydrometric data at the basin scale. In CIERMMI Women in Science TXVI Engineering and Technology. ECORFAN. pp 107-145.

Secretaría de Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo. (2012). Decreto de la Zona de Restauración y Protección Ambiental del Área de Recarga del Manantial de La Mintzita. Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo, Tomo CLV, Num 4.

Souza E De (2019). Spatial and temporal potential groundwater recharge: the case of the Doce River Basin, Brazil. 1-27.

Stockholm Environment Institute (2009). Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.



Análisis de reconstrucción de series históricas en base a algoritmo estocástico y algoritmo IDW

Analysis of reconstruction of historical series based on stochastic algorithm and IDW algorithm

Alejandra Correa González¹, Marco Antonio Martínez Cinco¹ , Joel Hernández Bedolla² ,
Sonia Tatiana Sánchez Quispe² , Mario Alberto Hernández Hernández³ .

¹ División de estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Química. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia No. 403 Colonia Centro, C.P. 58000, Morelia, Michoacán.

² Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia No. 403 Colonia Centro, C.P. 58000, Morelia, Michoacán.

³ Investigador por México CONAHCYT–Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica SN, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510.

Historial

Manuscrito recibido: 6 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 11 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Marco Antonio Martínez Cinco

e-mail: marco.martinez@umich.mx

ORCID: 0000-0001-8931-4169

Resumen

La precipitación y la temperatura son variables cruciales del ciclo hidrológico, por lo que deben representar la variabilidad espacial y temporal por medio de una distribución suficientemente densa. Sin embargo, la información recabada por las bases de datos institucionales presenta vacíos. El presente trabajo analiza las series de precipitación de acuerdo a la deducción de datos faltantes en base al algoritmo determinista del Inverse Distance Weighted (IDW) y el algoritmo estocástico Multivariate Autoregressive Model of Climate Variables (MASCV). Estos algoritmos se utilizaron para la reconstrucción de cinco series de precipitación en la cuenca del Lago de Cuitzeo. El análisis de las series reconstruidas se realizó por medio del análisis gráfico y cuantitativo, obteniendo resultados aceptables, por parte de los dos algoritmos, sin embargo, IDW, presenta una mejor predicción en los valores máximos.

Palabras clave: Deducción de datos faltantes, recursos hídricos, variables climatológicas.

Introducción

El estudio de las variables climáticas como la temperatura y precipitación ha sido de mucha importancia en los últimos años (Sidău *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2022). La gestión de recursos hídricos (Konapala *et al.*, 2020; Niu y Feng 2021; Srivastav *et al.*, 2021),

Abstract

Precipitation and temperature are crucial variables of the hydrological cycle, so they should represent spatial and temporal variability through a sufficiently dense distribution. However, the information collected by institutional databases has gaps. The present work analyzes the precipitation series according to the deduction of missing data based on the deterministic algorithm of the Inverse Distance Weighted (IDW) and the stochastic algorithm Multivariate Autoregressive Model of Climate Variables (MASCV). These algorithms were used for the reconstruction of five precipitation series in the Cuitzeo Lake basin. The analysis of the reconstructed series was carried out by means of graphical and quantitative analysis, obtaining acceptable results.

Keywords: Deduction of missing data, water resources, rainfall.

recargas de unidades hidrogeológicas (Anduaem *et al.*, 2021; Hughes *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021), diseño de estructura hidráulicas y balances hidrológicos (Mebarki *et al.*, 2024; Ruiz-García *et al.*, 2023; Vangelis *et al.*, 2022), por indicar algunos ejemplos, están directamente relacionados con las variables climáticas, por lo cual,

surge la necesidad de tener información de estas, de forma distribuida espacialmente y temporalmente. La selección de los registros de temperatura y precipitación tanto de forma espacial como temporal, siempre busca trabajar los que tengan una mejor predicción de las características de la zona de estudio (Al-Thwaynee *et al.*, 2023; Henriksen *et al.*, 2024; Lucey y Gallien 2024), por lo cual, se utilizan series temporales que contengan la mayor cantidad de información posible, además de utilizar pruebas estadísticas que evalúen la homogeneidad (Chandole y Joshi 2023; Mohammed y Scholz 2023). Sin embargo, a pesar de esto la mayoría de las veces, la información no se presenta de forma secuencial a través de los años, por lo cual, surge la necesidad de utilizar modelos de deducción para los datos faltantes.

Los algoritmos de deducción de datos faltante se han utilizado desde hace varios años, sin embargo, en los últimos años se ha hecho énfasis en modelos de predicción en situaciones futuras principalmente por el cambio climático. En general, los modelos aplicados en el área de hidrología, pueden ser determinísticos y estocásticos (Farmer y Vogel 2016; Nesru 2023). Los modelos determinísticos se basan en resultados que no cambian las veces que se aplique el método, con resultados determinados. Por su parte los modelos estocásticos, se basan en probabilidades de acuerdo a información estadística, que puede variar cada vez que se aplique el método.

Los algoritmos deterministas se han usado desde hace varios años, con algoritmos como el método de la razón normal propuesto por primera vez por Paulhus y Kohler (1952), ampliamente aplicado en la deducción de datos faltantes (Morales *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2019) y el método de IDW, siendo uno de los más utilizados en estudios hidrológicos actualmente (Chin *et al.*, 2023; Workneh *et al.*, 2024a); así como el método de regresión lineal es muy utilizado para estimar los valores de datos faltantes de precipitación (Ahmed y Mohamed 2021; Shaker *et al.*, 2020). Por su parte los algoritmos estocásticos, debido al avance de la tecnología, han presentado un mayor desarrollo, con modelos como CLiMATE GENerator (CLIGEN) (Fullhart *et al.*, 2023, 2024), CLiMATE GENerator (CLIMGEN) (Safaeq y Fares 2011; Sudhishri 2014), Long Ashton Research Station-Weather Generator (LARS-WG) (Kavwenje *et al.*, 2022; Munawar *et al.*, 2022) y Multivariate Autoregressive Model of Climate Variables (MASCV) (Hernández-Bedolla *et al.*, 2022).

En México, la Red Nacional de la CONAGUA, lleva el

registro de la información histórica de aproximadamente 2800 estaciones climatológicas, las cuales contienen información sobre temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación; esta información se encuentra almacenada en bases de datos como Climate Computing Project (CLICOM, 2013) o Sistema de Información Geográfica del Extractor Rápido de Información Climatológica (SIG ERIC, 2016). Por lo cual, para la deducción de dichas series los algoritmos más utilizados son deterministas como: razón normalizada, IDW y regresión lineal (Gallegos-Cedillo *et al.*, 2016; Gómez Guerrero y Aguayo Arias 2019; Trujillo *et al.*, 2015)

El objetivo del presente estudio es el análisis de reconstrucción de series históricas en base a algoritmo MASCV y algoritmo IDW para la deducción de series de cinco estaciones de precipitación de cincuenta y tres años (1964 a 2017), localizadas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, con la finalidad de evaluar las diferencias en cada uno de los métodos, para estaciones que pueden ser utilizadas en estudios hidrológicos.

Materiales y métodos

Algoritmo IDW

Este algoritmo ha sido verificado tanto teórica como empíricamente y considera que el dato faltante puede ser estimado en base en las estaciones circundantes (Noor *et al.*, 2022). El método puede ser aplicado para estimar valores diarios, mensuales o anuales. La premisa general del algoritmo IDW, es que los valores de los atributos de cualquier par de puntos están relacionados entre sí, pero su similitud es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos (Noor *et al.*, 2022). Su ecuación se muestra a continuación.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N W_i u_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (1)$$

Donde:

u , es el valor faltante de precipitación, mm;

u_i es el valor de la precipitación de las estaciones vecinas;

w_i es la distancia euclidiana de la estación de deducción a la estación a llenar;

N es el número de estaciones para la deducción.

Algoritmo MASCV

El algoritmo MASCV fue desarrollado para la generación de series sintéticas por Hernández-Bedolla *et al.*

(2022) para la ocurrencia diaria de precipitaciones y su efecto sobre las temperaturas máximas y mínimas, así como el modelo autorregresivo multivariado aplicado a precipitaciones. MASCV utiliza la cadena de Markov para identificar la ocurrencia diaria de precipitación y un modelo autorregresivo multisitio multivariado. Este algoritmo modeliza la ocurrencia de precipitación y la temperatura en un modelo conjunto, en relación del resultado total del proceso estocástico (Ecuación 2):

$$Tt = XtYt \tag{2}$$

Donde:

Tt es el modelo de precipitación,

Xt es el modelo de ocurrencia de precipitación y

Yt es el proceso estocástico completo.

Comparación y validación de algoritmos

La comparación de las series anuales reconstruidas obtenidas, se realizó por medio del análisis gráfico y cuantitativo. El análisis gráfico tiene la finalidad de evaluar el ajuste en medias, máximos y mínimos anuales. El análisis cuantitativo involucra parámetros estadísticos anuales, estos son: media, desviación estándar y correlación entre series reconstruidas (r).

La validación de ambos algoritmos se realiza en base a valores mensuales, por medio de pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia por medio del programa GESTAD (Cazares Rodríguez 2021). Entre las pruebas realizadas se incluyen: T-Student, T-ST (1899), Cramer, CRA (Campos 1998), Bartlett, BAR (1937), pendiente de regresión lineal, PR (Hameed *et al.*, 1997), Spearman, SP (McGhee 1985), Mann Kendall, M-K (Kendall 1975) límites de Anderson, L-A (Anderson

1942) y Wald-Wolfowitz, W-W (1943), las cuales son utilizadas ampliamente en análisis de homogeneidad en series de precipitación (Kocsis *et al.*, 2020; Machiwal *et al.*, 2022; Oza y Kishtawal 2014; Silva *et al.*, 2019).

Zona de estudio

El lago de Cuitzeo se localiza entre los paralelos 19°53'15" y 20°04'30" de latitud norte y los meridianos 100°50'20" y 101°19'30" de longitud oeste, a una altitud aproximada de 1830 msnm. Su ubicación dentro de la región fisiográfica conocida como Sistema Volcánico Transversal, en la zona centro-sur de México, favorece su origen debido a la obstrucción del drenaje superficial por la formación de volcanes, pero también se debe a la presencia de fallas geológicas activas de longitud considerable y dirección predominante este-oeste. El lago de Cuitzeo y su cuenca se encuentran ubicados en los límites de los estados de Michoacán y Guanajuato. La extensión de la cuenca es de aproximadamente 4000 km², de los cuales la mayor parte corresponde a Michoacán. La extensión promedio del lago, incluyendo zonas de inundación (**Figura 1**), es de aproximadamente 400 km² (Bravo Espinosa *et al.*, 2008).

La información de precipitación media escala diaria se extrajo de la base de datos CLICOM. Sin embargo, la información que se tiene en esta base de datos se tiene hasta el 2015, además, de acuerdo a información del Sistema Nacional del Servicio Meteorológico (SNM) (CONAGUA, 2023), se extendieron las series de las cinco estaciones, hasta el 2017. Por lo cual, para el presente estudio se analizó la reconstrucción de la serie histórica de cinco estaciones con series de precipitación de entre 1964 al 2017.

En la **Tabla 1**, se muestra el porcentaje de información contenido en cada estación antes de la deducción de

Tabla 1. Resultados de pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia obtenidos dentro de las series históricas estaciones analizadas.

Tipo	Estación	% INFO		T-ST	CRA	BAR	PR	SP	M-K	L-A	W-W
		Diaria	Anual								
HIST	16016	0.81	0.70	H	NH	H	E/T	E/T	E/T	I	I
	16087	0.79	0.66	H	H	NH	S/T	S/T	S/T	I	I
	16096	0.78	0.62	H	NH	H	E/T	E/T	E/T	I	I
	16136	0.64	0.23	NH	NH	H	E/T	E/T	E/T	I	I
	16119	0.79	0.70	H	H	H	S/T	S/T	S/T	S/D	I

H: Homogénea; NH: No Homogénea; E/T: Existe tendencia; S/T: Sin tendencia; I: Independente; S/D: Sin datos.

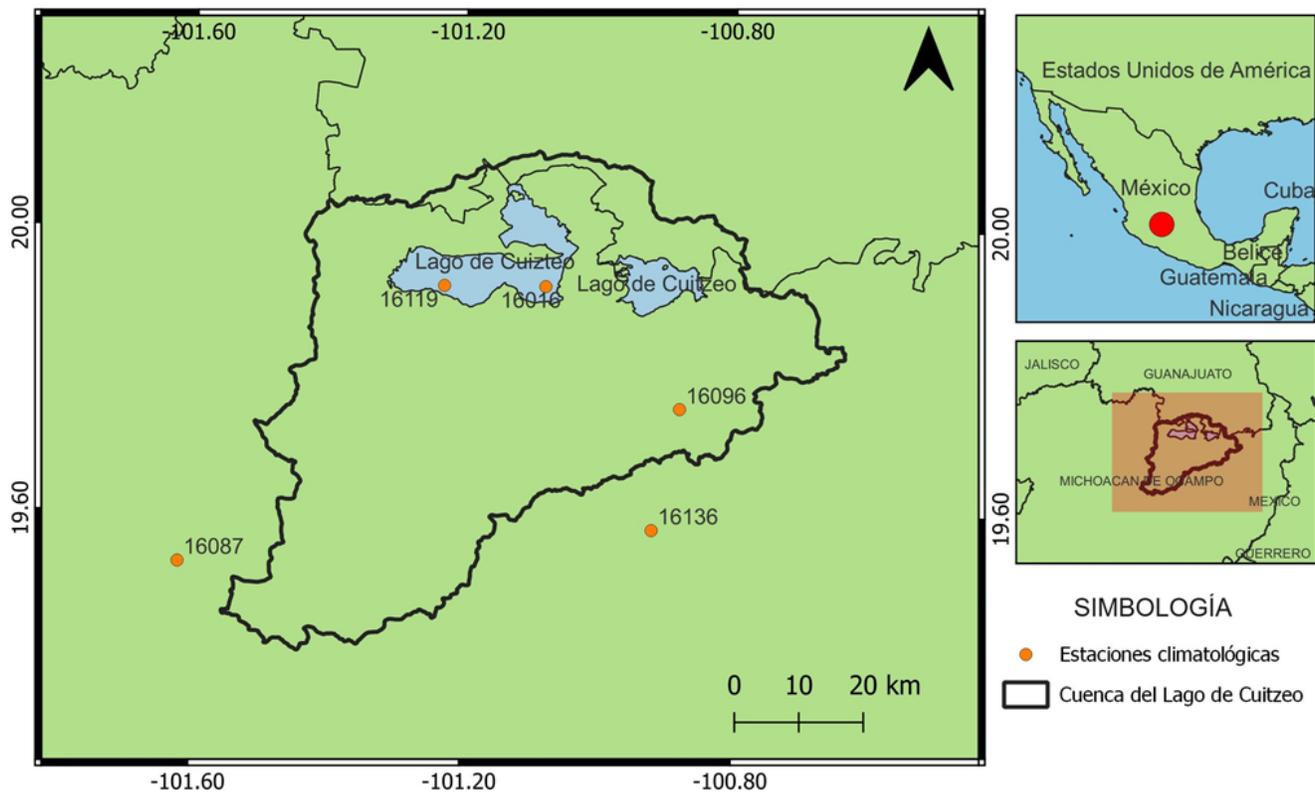


Figura 1. Localización de zona de estudio y estaciones climatológicas.

datos faltantes de forma diaria y anual. El porcentaje de información anual mostrado, representa los años completos sin datos diarios de la información actualizada (1964-2017). Además, se muestran los resultados de las pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia aplicadas a las series históricas.

Aplicación de algoritmos

Para la aplicación IDW, se realizó la deducción de datos faltantes de forma diaria, entre las cinco estaciones seleccionadas. Este cálculo se realizó en base a las tres coordenadas de cada una de las estaciones. Por medio de MASCV se generaron 100 series diarias equiprobables de forma multivariada, para después calcular su media. A partir de estas series de valores medios, se realizó la deducción de datos faltantes de forma diaria.

A partir de las series diarias se calcularon las series de valores anuales de precipitación. Las series anuales reconstruidas se evaluaron por medio de la media, desviación estándar y correlación entre series reconstruidas (r). Con las dos series diarias reconstruidas, se calculó la serie mensual, en la cual se realizaron pruebas de ho-

mogeneidad, tendencia e independencia por medio del programa GESTAD.

Resultados

Las series reconstruidas con ambos algoritmos presentan patrones similares en sus tendencias, sin embargo, la mayor diferencia se da en los valores máximos de precipitación calculados (Figura 2). En las Figuras 2a, b y e se observa que los valores con los dos algoritmos son similares, con algunos años en los cuales se presenta una variación entre los valores calculados, ya que con el algoritmo IDW, se presenta un 67% de valores mayores respecto a los calculados con el algoritmo MASCV, presentando una media de 137.34 mm anuales por encima que MASCV. En las Figuras 2c y d, los resultados de la aplicación de los dos algoritmos divergen, ya que se observa existen mediciones en las cuales IDW genera valores anuales de más 1000 mm y MASCV, calcula valores de 600 mm aproximadamente (Figura 2d).

Los resultados que se tienen de acuerdo a información estadística se muestran en la Tabla 2. Para la estación 16016, se tiene una información del 19% y 30% de vacíos

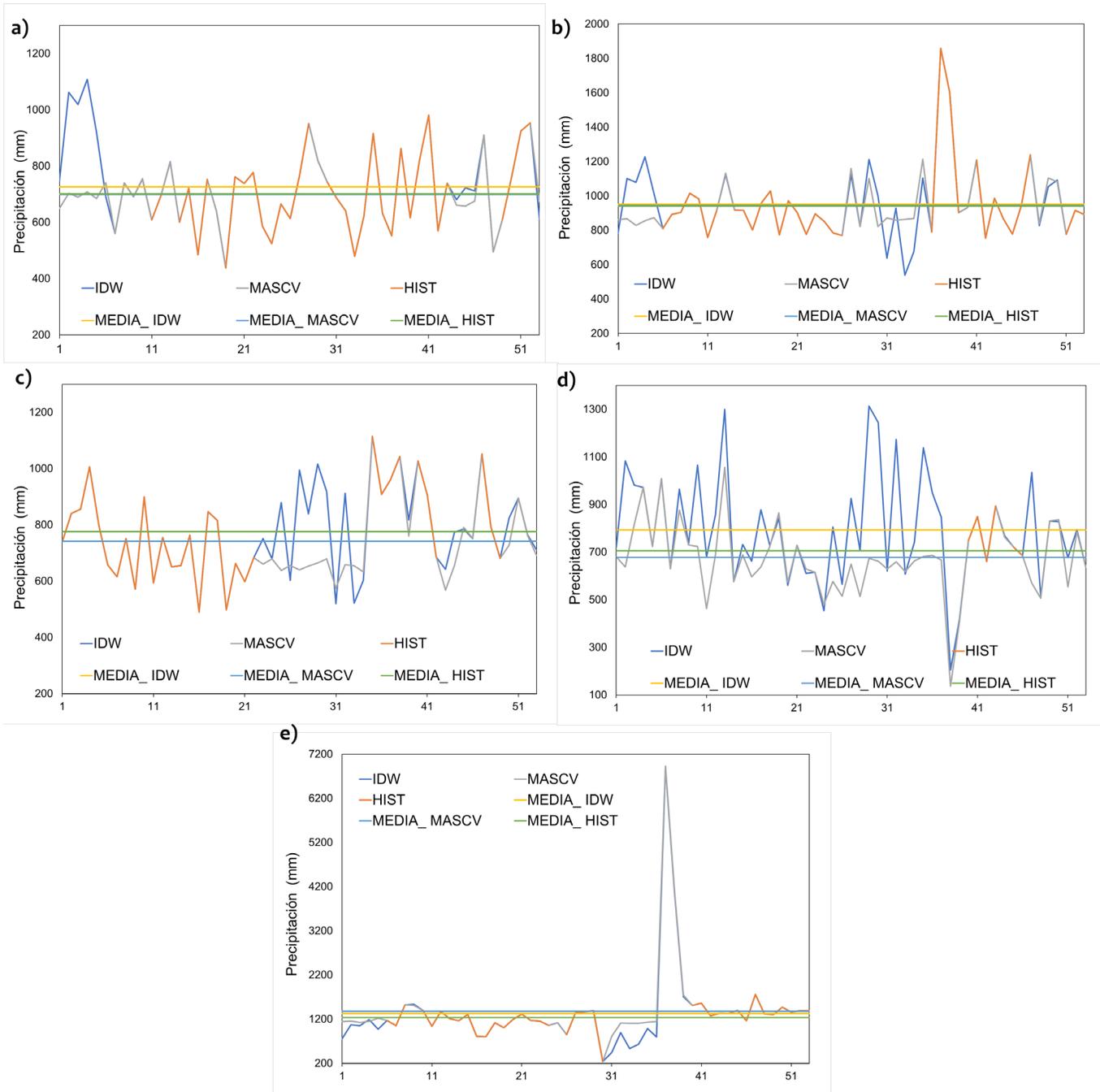


Figura 2. Series anuales obtenidas con los algoritmos IDW y MASCV. **a)** Estación 16016. **b)** Estación 16087. **c)** Estación 16096. **d)** Estación 16136. **e)** Estación 16119. Serie anual de 1964 al 2017 (53 años).

en serie diaria y anual, respectivamente; las medias que se presentan son de 728.2 para IDW, 699.38 para MASCV y 701.55 la serie histórica; la desviación estándar de cada serie es de 153.36, 124.61 y 141.11, respectivamente, con r de 0.81 entre las dos series reconstruidas. En la estación 16087 después de realizar la deducción de información diaria del 21% de datos, lo cual representa de forma anual el 34%, se obtuvieron medias de 951.52,

945.46 y 941.90, para los algoritmos de IDW, MASCV e histórico, respectivamente; la desviación estándar se muestra con valores de 216.43, 199.20 y 226.04 para la información presentada con el mayor r . En la estación 16096, se tiene un porcentaje de vacíos del 22 y 38% de forma diaria y anual; con medias similares de 775.96, 741.87 y 775.82 en los algoritmos IDW, MASCV e histórico respectivamente; con las desviaciones estándar

Tabla 2. Resultados obtenidos dentro de las estaciones analizadas.

Estación	Media (mm)			Desviación estándar (mm)			r
	IDW	MASCV	HIST	IDW	MASCV	HIST	
16016	728.52	699.38	701.55	153.36	124.61	141.11	0.81
16087	951.52	945.46	941.90	216.43	199.20	226.04	0.88
16096	775.96	741.87	775.82	154.10	142.72	162.07	0.80
16136	792.89	677.55	706.01	219.53	151.34	89.72	0.62
16119	1326.79	1382.70	1233.69	920.30	899.33	261.92	0.62

HIST: Serie histórica; r: Correlación entre serie llenada entre IDW y MASCV.

Tabla 3. Resultados de pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia obtenidos de las series reconstruidas.

Tipo	Estación	T-ST	CRA	BAR	PR	SP	M-K	L-A
IDW	16016	H	H	H	S/T	S/T	S/T	Dep 1
	16087	H	H	NH	S/T	S/T	S/T	I
	16096	NH	NH	H	S/T	E/T	S/T	I
	16136	H	NH	H	S/T	S/T	S/T	I
	16119	H	H	NH	S/T	E/T	E/T	Dep 1
MASCV	16016	NH	H	H	S/T	S/T	S/T	I
	16087	H	H	NH	S/T	S/T	S/T	I
	16096	H	H	NH	S/T	S/T	S/T	Dep 1
	16136	H	NH	H	E/T	S/T	S/T	I
	16119	H	H	NH	S/T	E/T	E/T	Dep 1

H: Homogénea; NH: No Homogénea; E/T: Existe tendencia; S/T: Sin tendencia; I: Independiente; Dep 1: Dependiente 1 año.

menores de las cinco estaciones analizadas de 154.10, 142.72 y 162.07 y con r de 0.80. En la estación 16136, se presenta la mayor cantidad de información llenada con un 36% vacíos diarios, que influye en el 77% de información anual, en el cual se tiene una diferencia de poco más de 100 mm entre los dos algoritmos, con 792.89 y 677.55 valores anuales, quedando la media histórica en 677.55; en lo que respecta a la desviación estándar, los dos métodos utilizados presentan una diferencia notable con la histórica, siendo 219.53, 151.34 y 89.72 para los métodos de IDW y MASCV, e histórico respectivamente, con un rentre las dos series aceptable. Para la estación 16119, se tiene un porcentaje de vacíos de 21% de forma diaria para llenar un 30% de forma anual; con medias similares con una variación de las medias entre los dos métodos de alrededor de 60 mm de precipitación anual, teniendo una media histórica menor de 1233.69; en lo que respecta a la desviación estándar se tienen valores de 920.30, 899.33 y 261.92, para cada una de las series; esta estación es la que genera

un r menor al evaluar la relación vacíos-correlación con un valor de 0.62.

Los resultados presentados de acuerdo a las pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia se muestran en la **Tabla 3**. En las pruebas de homogeneidad: En IDW, se presentaron cambios en la estación, 16016 y 16136, se presentó homogénea la serie después de realizar la deducción de datos faltantes, en la prueba de T-ST y CRA, respectivamente. En la estación 16119, se perdió la homogeneidad de acuerdo a BAR. En el MASCV, se presentaron las series homogéneas, después de la deducción de datos de las estaciones 16016, 16096 y 16136, en CRA para las primeras dos y T-ST, para la última. En las estaciones se perdió la homogeneidad de la estación 16016, 16096 y 16119, en las pruebas de T-ST y BAR. Se observa que la estación 16136, cambio en la prueba de T-ST, a homogénea en ambas pruebas, siendo una de las que menor información presentaba y la estación 16119, pierde su homogeneidad en ambas pruebas.

Los resultados de la tendencia muestran que en IDW, es donde se realizó un mayor cambio, principalmente en la estación 16016, la cual, de acuerdo a las tres pruebas de tendencia, PR, SP y M-K, presentaba tendencia en la serie original, y de acuerdo a la deducción, se presenta sin tendencia. Algo similar sucede con las estaciones 16096 y 16136, mejorando los resultados de la serie original en la prueba M-K y PR, en ambos casos. En MASCV, se observaron de igual forma, mejores resultados, en la estación 16016, 16096 y 16136. Sin embargo, en la estación 16119, se presentó dependencia en los dos algoritmos. Respecto a las pruebas de independencia, se presentaron algunos cambios en L-A, con dependencia de un año en las estaciones 16016 y 16119 para IDW y 16096 y 16119.

Discusión

El algoritmo IDW ha sido utilizado para deducción de datos de precipitación y otras variables climáticas a escala diaria, mensual y anual (Chutsagulprom *et al.*, 2022; Giarno *et al.*, 2020; Workneh *et al.*, 2024b). Por otro lado, los modelos estocásticos han sido utilizados para la generación de series diarias, mensuales y anuales (Ceyhunlu y Ceribasi 2024; Khalaf *et al.*, 2022; Xiang *et al.*, 2020) y la deducción de datos diarios mensuales y anuales (Hasanpour Kashani y Dinpashoh 2012; Teegavarapu y Chandramouli 2005).

El análisis de reconstrucción de series históricas en base a algoritmo MASCV y algoritmo IDW se realizó en base a estaciones con amplios registros de un alto porcentaje de información efectiva. Puesto que la mayoría de los estudios enfocados a los recursos hídricos requiere de esta característica en la selección de registros (Campos, 1998; CGCSA 2016; Patiño, 2021).

El presente trabajo analizó las variaciones que pueden tener las series reconstruidas en cada uno de los algoritmos y si alguno de los dos arroja resultados notablemente mejores. Los resultados obtenidos demuestran que el algoritmo MASCV, presenta un desempeño equiparable con el algoritmo IDW, aunque haya sido formulado para generar series sintéticas (Hernández-Bedolla *et al.*, 2022, 2023). Por lo cual, en ambos algoritmos, las series reconstruidas presentan características aceptables, sin embargo, IDW presenta una mejor predicción de valores máximos y mínimos de precipitación, por lo que mostró un mejor desempeño que MASCV.

Como se observa en la **Tabla 2**, la r de las dos últimas estaciones es igual, aunque el porcentaje de vacíos que fueron deducidos son diferentes, siendo menor para la estación 16136 que para la estación 16119, de la misma manera si se compara r de las estaciones 16016 y 16096, las correlaciones obtenidas son muy parecidas, sin embargo el porcentaje de vacíos de forma diaria y anual es diferente, por lo cual, de acuerdo a los resultados obtenidos, r entre las dos series, no presenta una relación directa respecto al número de vacíos a ser deducidos.

El algoritmo MASCV presentó una media y desviación estándar menor que en la serie histórica e IDW, lo que representa un 5.9 y 16.3%, en comparación con la media y desviación estándar calculados con IDW, esto se puede observar al analizar las gráficas de series anuales, ya que predice un número menor en valores máximos y mínimos. Por lo cual, para estudios de eventos extremos, puede proporcionar una mejor predicción el método IDW. En lo que respecta en las pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia, se observa, que se presentan algunos cambios en las estaciones mejorando resultados o no.

Se realizó la deducción de datos faltantes en ambos modelos de forma multivariada. MASCV presenta la ventaja que puede ser utilizado con información de dos estaciones a diferencia de IDW, que implica la utilización un mínimo de cuatro estaciones para su deducción (Campos, 1998), así como implementar varias recomendaciones como son: que debe ser con un mínimo de cuatro estaciones vecinas distribuidas de forma espacial dentro de los cuatro cuadrantes de orientación geográfica (Campos, 1998) o en base a valores de correlación aceptables (Almasi *et al.*, 2014; Jie *et al.*, 2013).

Conclusiones

El análisis de reconstrucción de series históricas en base a algoritmo MASCV y algoritmo IDW, de acuerdo a los resultados obtenidos, con los dos algoritmos es aceptable, presentando una mejor predicción con IDW y pueden ser utilizados en diversos estudios, con reserva del objetivo e información disponible. En forma general, los algoritmos estocásticos presentan ventajas como la utilización de una única serie para la deducción de datos, dependiendo de la escala y la información disponible dentro de la zona de estudio puede ser una característica importante en su selección. Por otro lado, el método IDW,

es un método muy utilizado, que presenta confiabilidad dentro de sus resultados tanto precipitación como temperatura.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca prestada para realizar el Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química. A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitirme realizar mis estudios de Doctorado en la Facultad de Ingeniería Química. A la Facultad de Ingeniería Química, por la oportunidad de desarrollar mi tema de tesis dentro de su programa.

Referencias

Ahmed HAY, Mohamed SWA Rainfall (2021). Prediction using multiple linear regressions model. In: *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*. pp 1-5. doi:10.1109/ICCCEEE49695.2021.9429650.

Almasi A, Jalalian A, Toomanian N (2014). Using OK and IDW methods for prediction the spatial variability of a horizon depth and OM in soils of Shahrekord, Iran. *E3 Journal of Environmental Research and Management* 5(8):0139-0147.

Al-Thwaynee OF, Melillo M, Gariano SL, Park HJ, Kim S-W, Lombardo L, Hader P, Mohajane M, Quevedo RP, Catani F, Aydda A (2023). DEWS: A QGIS tool pack for the automatic selection of reference rain gauges for landslide-triggering rainfall thresholds. *Environmental Modelling & Software* 162:105657. doi:https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105657.

Anderson RL (1942). Distribution of the Serial Correlation Coefficient. *The Annals of Mathematical Statistics* 13(1):1-13. doi:10.1214/aoms/1177731638.

Andualet TG, Demeke GG, Ahmed I, Dar MA, Yibeltal M (2021) Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 37:100917. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100917.

Bravo Espinosa M, García Oliva F, Ríos Patrón E, Mendoza Cantú M, Barrera Camacho G, López Granados E, Serrato Barajas BE, Sáenz Reyes T (2008). *La cuenca del Lago de Cuitzeo: problemática, perspectivas y retos hacia su desarrollo sostenible*. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología, Michoacán. doi:10.22201/ciga.9789707035782p.2008.

Campos A (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis

Potosí: Editorial Universitaria Potosina.

Cazares Rodríguez E (2021). Gestión de la sequía operativa en la gestión de recursos hídricos en la cuenca del Río Duero Michoacán. Tesis de maestría, UMSNH. México.

Ceyhunlu AI, Ceribasi G (2024). Prediction of precipitation-temperature data and drought assessment of Turkey with stochastic time series models. *Pure and Applied Geophysics*. doi:10.1007/s00024-024-03559-0.

CGCSA (2016). *Análisis climatológico de la Región Centro del País. Reporte final*. Cd, México.

Chandole V, Joshi GS (2023). Case study of rainfall and temperature assessment through trend and homogeneity analyses in Vadodara and Chhotaudepur district of Gujarat State, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 195(5):561. doi:10.1007/s10661-023-11089-w

Chin RJ, Lai SH, Loh WS, Ling L, Soo EZ (2023). Assessment of Inverse Distance Weighting and Local Polynomial Interpolation for annual rainfall: a case study in Peninsular Malaysia. *Engineering Proceedings* 38(1):61. doi:10.3390/engproc2023038061.

Chutsagulprom N, Chaisee K, Wongsaijai B, Inkeaw P, Oonariya C (2022). Spatial interpolation methods for estimating monthly rainfall distribution in Thailand. *Theoretical and Applied Climatology* 148(1):317-328. doi:10.1007/s00704-022-03927-7.

Farmer WH, Vogel RM (2016). On the deterministic and stochastic use of hydrologic models. *Water Resources Research* 52(7):5619–33. doi:10.1002/2016WR019129.

Fullhart A, Ponce-Campos GE, Meles MB, McGehee RP, Armendariz G, Oliveira PTS, Das Neves Almeida C, de Araújo JC, Nel W, Goodrich DC (2023). Gridded 20-year climate parameterization of Africa and South America for a stochastic weather generator (CLIGEN). *Big Earth Data* 7(2):349-374. doi:10.1080/20964471.2022.2136610.

Fullhart AT, Ponce-Campos GE, Meles MB, McGehee RP, Wei H, Armendariz G, Burns S, Goodrich DC (2024). Towards global coverage of gridded parameterization for CLIGEN. *Big Earth Data* 8(1):142-165. doi:10.1080/20964471.2023.2291215.

Gallegos-Cedillo J, Arteaga-Ramírez R, Vázquez-Peña, MA, Juárez-Méndez J (2016). Estimation of missing daily precipitation and maximum and minimum temperature records in San Luis Potosí. *Ingeniería agrícola y biosistemas* 8(1):3-16. doi:10.5154/r.inagbi.2015.11.008.

Giarno, Didiharyono D, Fisuu AA, Mattingaragau A

- (2020). Influence Rainy and Dry Season to Daily Rainfall Interpolation in Complex Terrain of Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 469(1):012003. doi:10.1088/1755-1315/469/1/012003.
- Gómez Guerrero, Jenny Sofía, Mauricio Iván Aguayo Arias (2019). Evaluación de Desempeño de Métodos de Relleno de Datos Pluviométricos En Dos Zonas Morfoestructurales Del Centro Sur de Chile. *Investigaciones Geográficas* (99). doi:10.14350/rig.59837.
- Hameed T, Marino MA, DeVries JJ, Tracy JC (1997). Method for trend detection in climatological variables. *Journal of Hydrologic Engineering* 2(4):157-60. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:4(154)
- Hasanpour Kashani, Mahsa, Yagob Dinpashoh (2012). Evaluation of Efficiency of Different Estimation Methods for Missing Climatological Data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 26(1):59-71. doi:10.1007/s00477-011-0536-y.
- Henriksen, Rasmus Lau Thejlade, Jonas Bruun Hubrechts, Jan Kloppenborg Møller, Per Knudsen, Jonas Wied Pedersen (2024). Large-Scale Rain Gauge Network Optimization Using a Kriging Emulator. *Journal of Hydrology* 637:131360. doi:10.1016/j.jhydrol.2024.131360.
- Hernández-Bedolla, Joel, Liliana García-Romero, Chrystopher Daly Franco-Navarro, Sonia Tatiana Sánchez-Quispe, Constantino Domínguez-Sánchez (2023). Extreme Runoff Estimation for Ungauged Watersheds Using a New Multisite Multivariate Stochastic Model MASVC. *Water* 15(16):2994. doi:10.3390/w15162994.
- Hernández-Bedolla, Joel, Abel Solera, Javier Paredes-Arquiola, Sonia Tatiana Sanchez-Quispe, Constantino Domínguez-Sánchez (2022). A Continuous Multisite Multivariate Generator for Daily Temperature Conditioned by Precipitation Occurrence. *Water* 14(21):3494. doi:10.3390/w14213494.
- Hughes A, Mansour M, Ward R, Kieboom N, Allen S, Seccombe D, Charlton M, Prudhomme C (2021). The impact of climate change on groundwater recharge: National-scale assessment for the British mainland. *Journal of Hydrology* 598:126336. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126336.
- Jie, Chen, Zhang Hanting, Qian Hui, Wu Jianhua, Zhang Xuedi (2013). Selecting Proper Method for Groundwater Interpolation Based on Spatial Correlation. pp 1192-95 in *2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation*. IEEE.
- Kavwenje Sheila, Lin Zhao, Liang Chen, Evance Chaima (2022). Projected temperature and precipitation changes using the LARS-WG statistical downscaling model in the Shire River Basin, Malawi. *International Journal of Climatology* 42(1):400-415. doi:10.1002/joc.7250.
- Kendall MG (1975). *Rank Correlation Methods*. London, U.K: Charles Griffin & Co.
- Khalaf, Rasul M, Hussein HH, Waqed H Hassan, Zaid M Mohammed, Basim K Nile (2022). Projections of Precipitation and Temperature in Southern Iraq Using a LARS-WG Stochastic Weather Generator. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 128:103224. doi:10.1016/j.pce.2022.103224.
- Kocsis, Tímea, Ilona Kovács-Székely, Angéla Anda (2020). Homogeneity Tests and Non-Parametric Analyses of Tendencies in Precipitation Time Series in Keszthely, Western Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 139(3-4):849-59. doi:10.1007/s00704-019-03014-4.
- Konapala, Goutam, Ashok K Mishra, Yoshihide Wada, Michael E Mann (2020). Climate Change Will Affect Global Water Availability through Compounding Changes in Seasonal Precipitation and Evaporation. *Nature Communications* 11(1):3044. doi:10.1038/s41467-020-16757-w.
- Lucey JTD, Gallien TW (2024). quantifying compound flood event uncertainties in a wave and tidally dominated coastal region: the impacts of copula selection, sampling, record length, and precipitation gauge selection. *Journal of Flood Risk Management* 17(3):e12984. doi:10.1111/jfr3.12984.
- Morales JL, Horta-Rangel FA, Segovia-Domínguez I, Robles Morua A, Hernández JH (2019). Analysis of a new spatial interpolation weighting method to estimate missing data applied to rainfall records. *Atmósfera* 32(3):237-259. doi:10.20937/ATM.2019.32.03.06.
- M Noor I, Prasetyowati S, Sibaroni Y (2022). Prediction map of rainfall classification using random forest and inverse distance weighted (IDW). *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)* 4(2):723-731. doi:10.47065/bits.v4i2.1978.
- Machiwal D, Meena HM, Singh DV (2022). Overview of trend and homogeneity tests and their application to rainfall time series. In: Zakwan M, Wahid A, Niazkar M, Chatterjee U (eds) *Current directions in water scarcity research*, vol 7. Elsevier, pp 599-620. doi:10.1016/B978-0-323-91910-4.00034-0
- McGhee JW (1985). *Introductory Statistics*. New York, USA: West Publishing Co.
- Mebarki, Hanane, Nouredine Maref, Mohammed El-Amine Dris (2024). Modelling the Monthly Hydrological Balance Using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Case Study of the Wadi Mina Upstream Watershed. *Journal*

- of Groundwater Science and Engineering* 12(2):161–77. doi:10.26599/JGSE.2024.9280013.
- Mohammed, Ruqayah, Miklas Scholz (2023). Quality Control and Homogeneity Analysis of Precipitation Time Series in the Climatic Region of Iraq. *Atmosphere* 14(2):197. doi:10.3390/atmos14020197.
- Munawar Saira, Ghani Rahman, Muhammad Farhan Ul Moazzam, Muhammad Miandad, Kashif Ullah, Nadhir Al-Ansari, Nguyen Thi Thuy Linh (2022). Future Climate Projections Using SDSM and LARS-WG Downscaling Methods for CMIP5 GCMs over the Transboundary Jhelum River Basin of the Himalayas Region. *Atmosphere* 13(6):898. doi:10.3390/atmos13060898.
- Nesru, Mudesir (2023). A Review of Model Selection for Hydrological Studies. *Arabian Journal of Geosciences* 16(2):102. doi:10.1007/s12517-023-11194-7.
- Niu, Wen-jing, Zhong-kai Feng (2021). Evaluating the Performances of Several Artificial Intelligence Methods in Forecasting Daily Streamflow Time Series for Sustainable Water Resources Management. *Sustainable Cities and Society* 64:102562. doi:10.1016/j.scs.2020.102562.
- Oza, Markand, Kishtawal CM (2014). Trends in Rainfall and Temperature Patterns over North East India. *Earth Science India* 7(4). doi:10.31870/esi.07.4.2014.8.
- Patiño VNE (2021). Caracterización Hidrológica y Análisis de Escenarios de Cambio Climático de La Unidad Cebada, Ubicada En El Río Chambo (Ecuador), Con El Programa HYDROBID. Tesis de maestría, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares .
- Paulhus JLH, Kohler MA (1952). Interpolation of Missing Precipitation Records. *Monthly Weather Review*.
- Ruiz-García, Víctor H, Carlos Asensio-Grima, A. Guillermo Ramírez-García, and Alejandro Ismael Monterroso-Rivas (2023). The Hydrological Balance in Micro-Watersheds Is Affected by Climate Change and Land Use Changes. *Applied Sciences* 13(4):2503. doi:10.3390/app13042503.
- Safeeq, Mohammad, and Ali Fares (2011). Accuracy Evaluation of ClimGen Weather Generator and Daily to Hourly Disaggregation Methods in Tropical Conditions. *Theoretical and Applied Climatology* 106(3–4):321–41. doi:10.1007/s00704-011-0438-4.
- Shaker Reddy, Pundra Chandra, and Alladi Sureshbabu (2020). An Enhanced Multiple Linear Regression Model for Seasonal Rainfall Prediction. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control* 10(4):473–83. doi:10.2174/2210327910666191218124350.
- Sidău, Mugurel Raul, Adina-Eliza Croitoru, and Diana-Elena Alexandru (2021). Comparative Analysis between Daily Extreme Temperature and Precipitation Values Derived from Observations and Gridded Datasets in North-Western Romania. *Atmosphere* 12(3):361. doi:10.3390/atmos12030361.
- Silva, Elizangela Selma da, José Holanda Campelo Júnior, Francisco De Almeida Lobo, and Ricardo Santos Silva Amorim (2019). Homogeneity Evaluation of Historical Rainfall and Temperature Series in Mato Grosso. *Journal of Experimental Agriculture International* 1–7. doi:10.9734/jeai/2019/v35i330205.
- Srivastav, Arun Lal, Rajni Dhyani, Manish Ranjan, Sugghosh Madhav, and Mika Sillanpää (2021). Climate-Resilient Strategies for Sustainable Management of Water Resources and Agriculture. *Environmental Science and Pollution Research* 28(31):41576–95. doi:10.1007/s11356-021-14332-4.
- Sudhishri, Susama (2014). *Performance Evaluation of Daily Weather Generator ClimGen Model in a Mountainous Watershed of Himalayan Foothills*.
- Teegavarapu, Ramesh S. V, and V. Chandramouli (2005). Improved Weighting Methods, Deterministic and Stochastic Data-Driven Models for Estimation of Missing Precipitation Records. *Journal of Hydrology* 312(1–4):191–206. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.02.015.
- Trujillo, México Toro, Ana María, Arteaga Ramírez, Ramón ;. Vázquez Peña, Mario Alberto, Ibáñez Castillo, and Laura Alicia (2015). Relleno de Series Diarias de Precipitación, Temperatura Mínima, Máxima de La Región Norte Del Urabá Antioqueño*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6.
- Vangelis, Harris, Ioanna Zotou, Ioannis M. Kourtis, Vasilis Bellos, and Vassilios A. Tsihrintzis (2022). Relationship of Rainfall and Flood Return Periods through Hydrologic and Hydraulic Modeling. *Water* 14(22):3618. doi:10.3390/w14223618.
- Wang, Shih-Jung, Cheng-Haw Lee, Chen-Feng Yeh, Yong Fern Choo, Hung-Wei Tseng (2021). Evaluation of Climate Change Impact on Groundwater Recharge in Groundwater Regions in Taiwan. *Water* 13(9):1153. doi:10.3390/w13091153.
- Workneh, Habtamu Tsegaye, Xuelong Chen, Yaoming Ma, Eyale Bayable, and Anik Dash (2024)b. Comparison of IDW, Kriging and Orographic Based Linear Interpolations of Rainfall in Six Rainfall Regimes of Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 52:101696. doi:10.1016/j.ejrh.2024.101696.
- Xiang, Bo, Chunfen Zeng, Xinning Dong, and Jiayue Wang (2020). The Application of a Decision Tree and Stochastic

Forest Model in Summer Precipitation Prediction in Chongqing. *Atmosphere* 11(5):508. doi:10.3390/atmos11050508.

Yin, Lim Hui, Ng Yee Ting, Fam Pei Shan, Kunio Shimizu, and Habibah Lateh (2019). Estimation of Precipitation Data by Using Deterministic Interpolation Methods: A Case Study in Penang Island. P (0500)18 in.

Zhang, Zheyu, Yaoxiang Li, Roger A. Williams, Ya Chen, Rundong Peng, Xiaoli Liu, Yuanda Qi, and Zhiping Wang

(2023). Responses of Soil Respiration and Its Sensitivities to Temperature and Precipitation: A Meta-Analysis. *Ecological Informatics* 75:102057. doi:10.1016/j.ecoinf.2023.102057.

Zhu, Wei, Shuangtao Wang, Pingping Luo, Xianbao Zha, Zhe Cao, Jiqiang Lyu, Meimei Zhou, Bin He, and Daniel Nover (2022). A Quantitative Analysis of the Influence of Temperature Change on the Extreme Precipitation. *Atmosphere* 13(4):612. doi:10.3390/atmos13040612.



Evaluación hidráulica de la red de agua potable de San Martín Sabinillo, Oaxaca

Hydraulic evaluation of the drinking water network of San Martín Sabinillo, Oaxaca

Oscar Jesús Llaguno Guilberto* , Juan Maldonado Silvestre , Raúl Medina Mendoza , José Manuel Rodríguez Varela , Norma Ramírez Salinas , Jomaelah Morales Rayo , Edgar Eduardo López López

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnahuac no. 8532, C. P. 62550, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos.

Historial

Manuscrito recibido: 7 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 12 de septiembre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Oscar Jesús Llaguno Guilberto

e-mail: oscar_llaguno@tlaloc.imta.mx

ORCID: 0000-0002-9239-8081

Resumen

La localidad de San Martín Sabinillo, municipio de San Miguel Tlacotepec, Oaxaca se encuentra en la Sierra Mixteca, la población es de la etnia mixteca. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua realizó un análisis de la red de agua potable existente, con el fin de mejorar el servicio de la población. Mediante un modelo hidráulico, evaluado en el programa EPANET, se realizaron las propuestas de mejora al servicio, donde se propone ampliar una hora más la operación de captación, incluyendo 14 válvulas reductoras de presión y 16 de aislamiento con sus respectivas cajas; además del reemplazo de la tubería de succión de pozo principal dando un monto de \$746,638 pesos 00/100 M.N. con IVA.

Palabras clave: Agua potable, calibración, modelo hidráulico, EPANET, demanda.

Introducción

De acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda (INEGI, 2020), la localidad de San Martín Sabinillo, municipio de San Miguel Tlacotepec, Oaxaca, está conformada por una población de aproximadamente 380 habitantes con el 54% de mujeres y 46% hombres, de la etnia mixteco que hablan tanto su dialecto como el español. Se tienen 104 viviendas de las cuales 47 cuentan con letrina y 49 con excusado, sin embargo, los habitantes manifestaron no tener red de drenaje, por lo que de este último dato se intuye que son fosas sépticas equipadas con excusado.

La comunidad se encuentra localizada sobre una fisiografía ondulada de cerros y cañadas, con la mayoría

Abstract

The town of San Martín Sabinillo, municipality of San Miguel Tlacotepec, Oaxaca is located in the Mixteca mountain, the population is of the Mixteca ethnic group. The Mexican Institute of Water Technology carried out an analysis of the existing drinking water network in order to efficiently/improve the service of the population, through a hydraulic model evaluated in the EPANET program, service improvement proposals were made for 14 pressure reducing valves and 16 isolation valves with their respective boxes; in addition to the replacement of the main well suction pipe giving an amount of \$746,638 pesos with IVA.

Keywords: Water supply, calibration, hydraulic model, EPANET, demand.

de las casas en las laderas de los cerros, contando con un pequeño espacio como solar o traspatio de poca superficie ocupada con plantas de ornato y algunos árboles frutales y otras especies nativas. Los terrenos donde se asientan las viviendas son rocosos, prácticamente sin suelo superficial. Únicamente algunas casas se ubican en zonas más planas, entre ellas la Agencia Municipal, auditorio, iglesia y la librería comunitaria (IMTA, 2022).

El presente estudio tiene como objetivos proponer una mejor eficiencia a la red de agua potable de la comunidad para que tenga un mayor periodo de vida útil y que los costos de mantenimiento sean programables. El trabajo se realiza con base a la metodología propuesta en el CONAGUA (2015a) donde se plantean las siguientes

etapas para elaborar un modelo hidráulico: 1). Alcances del proyecto, 2). Recopilación de información, 3). Topología de la red, 4). Esqueletización de la red, 5). Asignación de la demanda, 6). Fugas en la red, 7). Calibración

Materiales y métodos

Recopilación de información

Captaciones

Se realizó un recorrido por las 5 captaciones de abastecimiento a la comunidad. La primera captación es un **“Pozo Artesiano”** con bomba sumergible con una altura de 12 m y un volumen de 84.82 m³. De acuerdo con el equipo ultrasónico, la bomba impulsa 7.8 l/s. En esta captación, se tiene un registro de prendido/apagado de la bomba de 8 a 11 am y un horario similar por la tarde (2 a 5 pm). La captación 2, se denomina **“Yosorino”**, el cual recibe el caudal de un manantial que se conduce a un cárcamo y posteriormente se impulsa con un equipo de bombeo, que funciona con energía a través de paneles solares y de acuerdo al equipo ultrasónico impulsa un caudal de 0.57 l/s, las dimensiones del cárcamo son de 5.50 x 5.50 x 2.50 m, resultando un volumen de 75.62 m³ (**Figura 1**), con una operación de 4 a 8 horas dependiendo de la demanda de los habitantes.

La tercera captación se tiene en el lugar conocido como **“Barranca pesada”** que es otro manantial, que concentra el agua en un cárcamo de 5.40 x 5.40 x 2.80 con una capacidad de 81.65 m³. La cuarta captación se denomina **“Tanque Martina”** que se abastece de dos escurrimientos subterráneos, cuenta con un cárcamo de dimensiones de 3.40 x 3.40 x 2.15 m, teniendo una capacidad de 24.85 m³, este almacenamiento se utiliza en algunas casas que se encuentran con la carga hidráulica suficiente, para que, por gravedad, pueden disponer del agua (**Figura 1**).

La última captación, es denominada **“Tierra Blanca”**, el cual cuenta con un reservorio de 15 m³ y reparte a una zona baja de la comunidad, la cual tiene dos tomas para recoger agua de la red y de esta captación.

Tanques

Se disponen de 3 tanques de almacenamiento para abastecer a las diferentes zonas de la localidad, estos son: 1). Principal, 2). Cisterna Rotoplas, y 3). Tanque Lulis (**Figura 2**).

El tanque principal, como su nombre lo indica es el almacenamiento esencial de la comunidad, ubicado en la parte alta recibe las aguas de la captación 1, 2 y 3.

Además que distribuye el agua a los tanques **“Cisterna Rotoplas”** y **“Lulis”**. Las dimensiones del tanque son de 4.50 x 4.50 x 3 m con una capacidad de 60 m³. La **“Cisterna Rotoplas”** es un tanque prefabricado de polietileno de alta densidad, con una capacidad de 10 m³, el cual solo tiene una línea de entrada y salida (2 pulgadas) y



Figura 1. a) Captación 1 (pozo principal), b) captación 2 (Yosorino), c) captación 3 (barranca pesada) y d) captación 4 (tanque Martina).



Figura 2. a) Tanque principal, b) Tanque cisterna Rotoplas, c) Tanque Lulis.

distribuye aproximadamente a 25 viviendas (**Figura 2**).

El tercer depósito se denomina “Lulis”, es de mampostería de sección cuadrada de 5.50 x 5.50 x 2.50 m, es decir un volumen de 75.62 m³ (**Figura 2**)

Topología de la red

El cabildo de la población proporcionó dos planos de la red de agua potable del año 2015, el primer plano contiene la información del centro de la población, carece de una geoposición de los datos, aunque tienen las cotas de arrastre de la red y del terreno natural, materiales y diámetros; información que se integrará a un Sistema de Información Geográfica (SIG). El segundo plano contiene la información de la zona este de la comunidad, donde contiene la información mencionada en el anterior plano y también no se encuentra georreferenciado.

Esta información se procesó, se almacenó y se plasmó en un SIG, donde se realizaron *Shape files* de puntos y líneas con el fin de generar el modelo hidráulico. Se tiene 198 nodos con información de: ID, coordenadas X, Y y elevación. Se tienen 99 tramos de tubería, con información de donde se conecta con el nodo del inicio y el final, diámetro, en total se tiene una longitud de 4,158.8 m de un diámetro de 2 pulgadas y de material de PVC.

La línea de conducción resultó de una longitud total de 1,690.9 m de línea principal de un diámetro de 2.5 pulgadas y un material de polietileno de alta densidad.

Se agregaron las captaciones 1, 2 y 3 que se encuentran conectadas a la red y los 3 tanques (**Figura 3**).

Esqueletización de la red

Horarios de prendido y apagado de la bomba

De acuerdo a la información recopilada en los recorridos, se asignó la información de los horarios de prendido y apagado de los equipos de bombeo.

Volumen de los tanques

Con información recopilada se realizó la curva altura-volumen con el fin de representar los 3 tanques.

Curva de variación de la demanda

La Conagua y el IMTA analizaron demandas para diferentes ciudades del país (**Figura 4**) y para pequeñas comunidades, menores a 20,000 habitantes (CONAGUA, 2015b). Esta información se agregó al modelo para poder simularse por un periodo de 24 horas continuas.

Demanda de la población.

Para asignarle la demanda de la población, se calcula el gasto medio de la población que no es más que la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de la población en un día de consumo promedio (CONAGUA, 2015a).

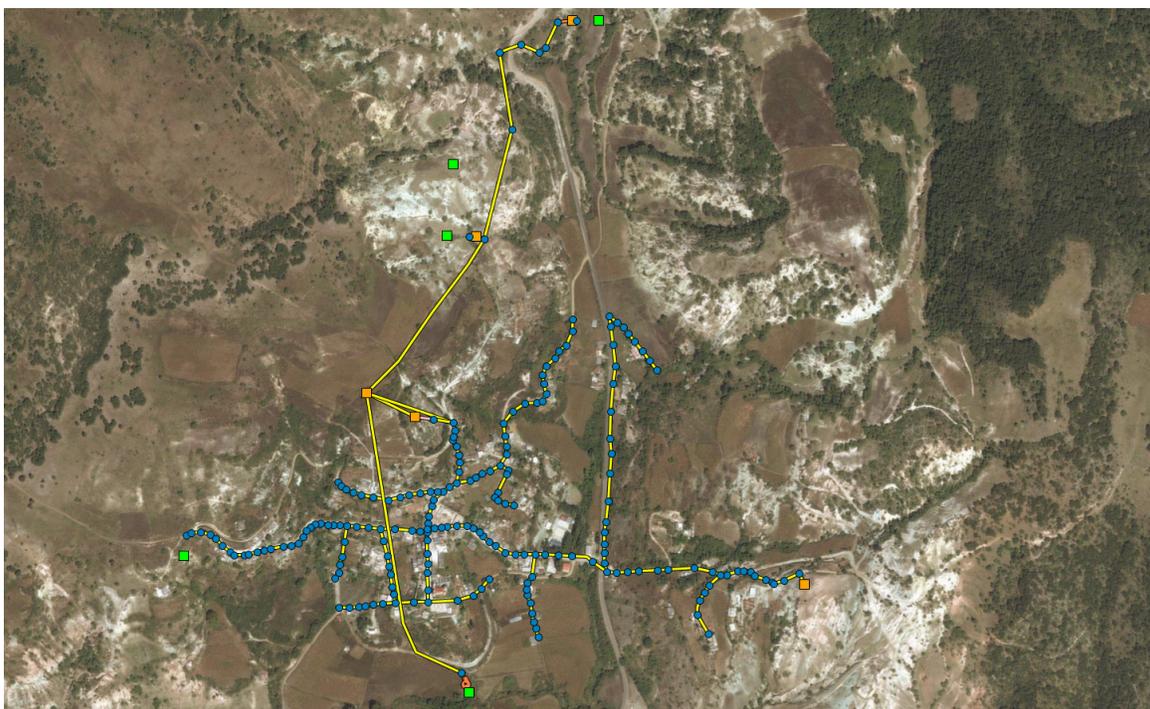


Figura 3. Información en un SIG de la red hidráulica de la comunidad de San Martín Sabinillo.

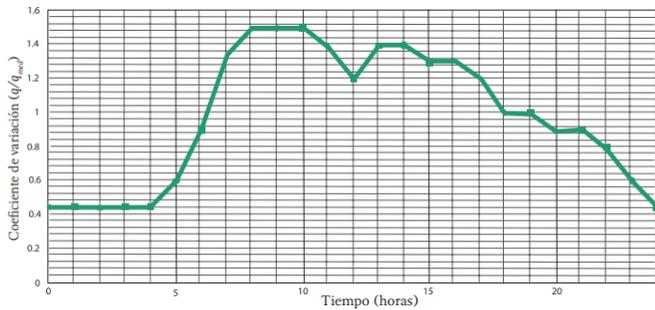


Figura 4. Curva de variación de la demanda para comunidades pequeñas (CONAGUA, 2015b).

$$Q_{med} = \frac{P \cdot D}{86400} \quad (1)$$

Donde:

Q_{med} = Gasto medio diario, en l/s,

P = Número de habitantes, hab.,

D = Dotación, en l/hab/día,

86,400 = segundos/día (s/d)

De los datos de la comunidad se tiene un número de habitantes de 411 personas, con una dotación de 150 l/hab/día, entonces sustituyendo se tiene 0.71 l/s. Considerando que se tienen aproximadamente 130 viviendas conectadas a la red, el gasto medio se reparte entre el total de las mismas, resulta un valor de 0.00548 l/s

Modelo hidráulico

EPANET es un software libre, desarrollado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de tuberías a presión (EPANET, 2023). Está diseñado para el uso con sistemas de distribución de agua potable, aunque en general puede ser utilizado para el análisis de cualquier fluido no compresible con flujo a presión.

Para el proyecto se construyó el modelo de EPANET, incluyendo los nodos con las cotas de superficie, los tanques con sus dimensiones, bombas con sus curvas características, operación del equipo de bombeo, condiciones de las tuberías y aportaciones de los manantiales a los tanques.

A las tuberías de conducción del agua potable se les agregó una rugosidad de manning de 0.01 y diámetro de 62.5 mm (líneas de conducción), para las tuberías de abastecimiento de agua potable se les determinó una rugosidad de manning desde 0.009 hasta 0.011 y un diámetro de 50.8 mm (línea de distribución).

Resultados y discusión

Simulación inicial

Se realizó una primera simulación de la red considerando los datos del funcionamiento de la red, y los resultados son los siguientes:

Se puede mencionar que el sistema no se encuentra equilibrado de las 2 a las 4 pm, esto se debe principalmente al manejo del tanque principal, porque se vacía a partir de las 2 am y el “Tanque Lulis” entra en funcionamiento hasta que empieza el bombeo de las 8 hasta 11 am, pero empieza la mayor demanda a partir de las 11 am y el volumen del tanque disminuye y se vacía, de las 2 a las 4 pm presenta un flujo mínimo (Figura 5).

Por lo anterior y para evitar problemas de equilibrio en el modelo se hacen las siguientes propuestas:

- En el equipo de bombeo del pozo principal se cambia el horario de bombeo, agregándose una hora más, es decir un horario de 8 a 12 am.

Segunda simulación

Generando la modificación en el control de horario de apertura y cierre del equipo de bombeo a 4 horas se tiene el siguiente resultado:

El tanque principal se vacía poco después de las 2 am y recupera hidráulica carga a partir de las 8 am y con dejarlo hasta las 12 am llega a tener una altura del tanque cercana a 1.6 m (Figura 6), para después utilizarse en los tiempos de mayor demanda del día y no teniendo

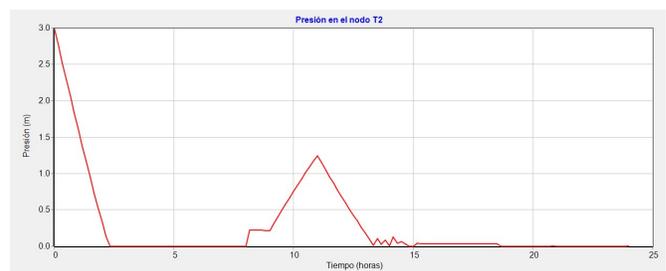


Figura 5. Presión en el nodo T2.

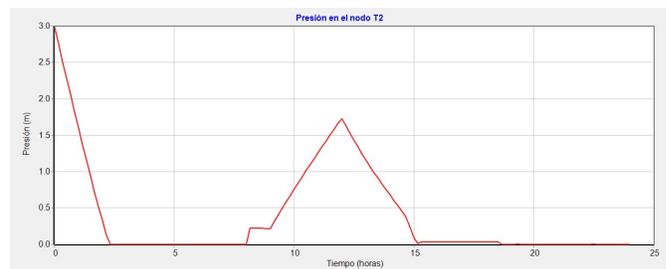


Figura 6. Presión del tanque T2 en la segunda simulación.

problemas de vaciado. Aunque cabe mencionar que el volumen del tanque es vaciado de forma similar con la primera simulación.

Con esta segunda simulación se comprobó que en todo momento se tiene agua en la red de distribución; el detalle que se logró establecer fue, el generarse presiones altas. Lo anterior debido a que el manual de redes de distribución de agua potable recomienda establecer una presión mínima de 10 mca y máxima de 50 mca, por lo que los nodos en color amarillo y rojo presentan esa situación que pone en sobrepresión la red y pueda generar un envejecimiento prematuro de la misma (**Figura 7**).

Calibración del modelo hidráulico

Para la calibración del modelo hidráulico se realizó un levantamiento de presiones en campo, conectando un manómetro en las llaves de nariz que se encuentran fuera de las viviendas, la **Figura 8** muestra las zonas y datos de las presiones medidas. Esta información se agregó al programa EPANET para conocer las diferencias o similitudes de las presiones en esos puntos (**Tabla 1**).

De acuerdo al de Manual de Agua Potable y Alcantarillado de la CONAGUA se considera que una red se encuentra calibrada cuando se tiene un error menor al 20 por ciento, por lo que 12.95% de la red de San Martín Sabinillo cumple con esas condiciones. Por lo tanto, se puede mencionar que el modelo se encuentra calibrado.

Propuesta para mejora de la red de distribución de agua potable

Las propuestas para la mejora de la red de distribución son:

- Tener en la bomba principal de alimentación de agua potable de la comunidad un horario de 4 horas (8 am a 12 am)
- Proponer válvulas reductoras de presión y válvulas de aislamiento, se ubicaron 8 puntos para la colocación de las mismas (**Figura 9**).

De acuerdo al modelo hidráulico, estas zonas son preferentes de establecer la ubicación de las válvulas, quedado como se presenta en **Tabla 2**.

Conclusiones

La tubería de la red de agua potable se encuentra en condiciones óptimas de funcionamiento, ya que no se detectaron caídas de presión al tiempo de medir las presiones en campo, por lo que es importante realizar la acción de instalación de válvulas de presiones y aislamiento, para evitar la sobrepresión de las uniones entre las tuberías, previniendo fugas visibles y no visibles. Es necesario planear mantenimiento preventivo periódico en los equipos de bombeo a fin que no se llegue al tiempo de vida límite. El reemplazo de la tubería

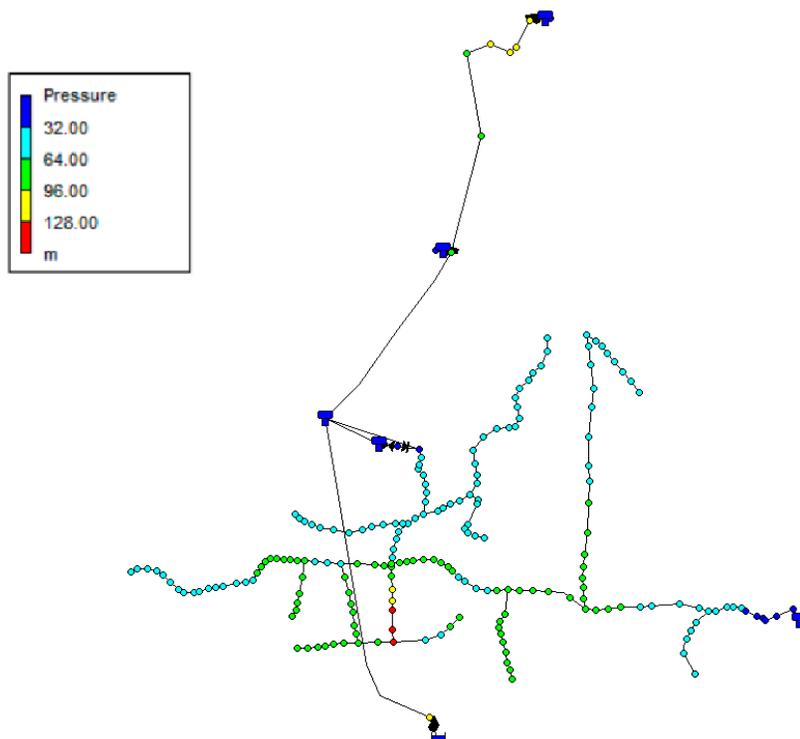


Figura 7. Presiones de la red de distribución de agua potable de San Martín Sabinillo.

Tabla 1. Estadísticas de la calibración para presión

Localización	Núm. de observaciones	Promedio de los valores observados	Promedio de los valores simulados	Promedio del error absoluto	Error geométrico
		%	%	%	%
J8	1	6	15.66	9.657	9.657
J4	1	9	26.42	17.422	17.422
J1	1	35	33.83	1.174	1.174
205	1	40	35.17	4.835	4.835
J19	1	70	72.91	2.911	2.911
J131	1	35	62	27.004	27.004
J123	1	29	53.32	24.321	24.321
J58	1	58	70.91	12.912	12.912
J48	1	66	74.14	8.143	8.143
J65	1	55	52.95	2.046	2.046
J167	1	72	66.93	5.07	5.07
J143	1	74	73.12	0.878	0.878
Total	12	45.75	53.11	9.698	12.95

de columna de agua del pozo principal es una acción prioritaria que debe llevarse a cabo a corto plazo, para aumentar el gasto que llegaría al tanque principal y con esto es probable que la propuesta de 4 horas se reduzca a un menor tiempo de bombeo. Para la instalación de las válvulas se requiere de \$671,424 pesos 00/100 M.N. con IVA y de ese costo el 10% se contempla para realizar un proyecto ejecutivo para la construcción de las válvulas. Para el reemplazamiento de la tubería de columna de agua del pozo principal, se establece un costo de \$76,214 pesos 00/100 M.N.

Agradecimientos

Al Instituto Mexicano de Tecnología por el apoyo y asesoría a las comunidades indígenas de la mixteca de Oaxaca.

Referencias

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

Tabla 2. Número de válvulas reductoras de presión (RP) y aislamiento (Ais).

Puntos	Coord X	Coord Y	Val. RP	Val. Ais
1	604359.66	1933476.89	1	2
2	604419.78	1933472.25	1	2
3	604531.88	1933538.52	2	2
4	604826.80	1933397.08	2	2
5	604697.88	1933428.62	3	2
6	604504.26	1933466.52	1	2
v2	604557.00	1933555.26	2	2
v3	604504.57	1933472.95	2	2
		Total	14	16

CONAGUA (2015a). “Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución”, Comisión Nacional del Agua, p. 13-38. ISBN: 978-607-626-014-2

CONAGUA (2015b). “Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento”, Comisión Nacional del Agua, p. 21. ISBN: 978-607-626-036-4

IMTA (2022) “Informe de la visita técnica realizada a la comunidad de san martín sabinillo, municipio de San Miguel Tlacotepec, Oaxaca”, Coordinación de de Calidad y Ecología del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos

EPANET (2023) “EPANET Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems” retomado el 06 de junio del 2023 de <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.



Análisis diagnóstico de la problemática del recurso hídrico en el estado de Colima, México, desde un enfoque sistémico

Diagnostic analysis of the water resource problem in the state of Colima, Mexico, from a systemic approach

Maura González Robles^{1*}  y Ana Luz Quintanilla Montoya² 

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad CEIBAAS (Centro de Estudios e Investigación en Biocultura, Agroecología, Ambiente y Salud). CEUGEA y Ecoparque Nogueras. Hacienda Nogueras s/n, Comala C.P. 28454, Colima, México.

² Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Colima.

Historial

Manuscrito recibido: 7 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 25 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Maura González Robles

e-mail: maura.gonzalez@ciad.mx

ORCID: 0000-0002-7201-2831

Resumen

En este trabajo se realiza un análisis con enfoque sistémico de la problemática del recurso hídrico en el estado de Colima. Para ello, como una primera aproximación, se realizó una encuesta a la población colimense, en algunas zonas rurales y urbanas del estado, contemplado a los 10 municipios, además de la realización de un taller de actores clave del recurso hídrico en el estado, que involucra tanto al ámbito académico, organizaciones civiles, sectores económico, social, político y agrícola. El objetivo, principal fue identificar la situación hídrica y reconocer los factores que han agudizado la escasez hídrica en el estado que sirvan como instrumento de desarrollo, prevención y planeación para afrontar y atender los grandes desafíos hacia un estado sostenible y próspero. Con dicha investigación se mostró la necesidad por parte de la población de contar con una mayor información del recurso hídrico, que acompañado de un cambio de visión del agua, podrán coadyuvar a aminorar apatías, desvalorización, desinformación, desconocimientos, conflictos y violencias en el estado, hacia un futuro incierto y que por otro lado, a pesar de que todos somos responsables del buen o mal uso del agua, existen niveles de responsabilidad, tal cual se muestra en la tabla de actores clave.

Palabras clave: diagnóstico, recurso hídrico, enfoque sistémico, estado de Colima.

Introducción

El derecho al agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos (ONU, 2019) no solo humanos

Abstract

A systemic approach analysis of the water resource problem in the state of Colima is carried out. As a first approximation, a survey was made of the population of Colima, in some rural and urban areas of the state, contemplating the 10 municipalities, in addition to the realization of a workshop of key actors of water resources in the state, involving both academia, social organizations, economic, social, political and agricultural sectors. The main objective was to identify the water situation and recognize the factors that have exacerbated water scarcity in the state, which serves as an instrument for development, prevention, and planning to face and address the major challenges toward a sustainable and prosperous state. This research showed the need for the population to have more information on the water issue, which, together with a change in the vision of water, could help to reduce apathy, devaluation, misinformation, ignorance, conflicts, and violence in the state. On the other hand, although we are all responsible for the good or bad use of water, there are levels of responsibility, as shown in the table of key actors.

Keywords: diagnosis, water resource, systemic approach, state of Colima.

sino de todos los seres vivos. Es por esto, que el agua debe tratarse fundamentalmente como un bien social y cultural, y no solo como un bien económico; es un derecho y recurso clave para la salud, la educación,

el crecimiento económico y el medio ambiente. De acuerdo a la información proporcionada por el Banco Mundial, alrededor de 2,000 millones de personas en todo el mundo no tiene acceso a servicios de agua potable, 3,600 millones de personas no cuentan con servicios de saneamiento seguro y 2,300 millones carecen de instalaciones básicas para lavarse las manos (Banco Mundial, 2022). No existe una solución única para los desafíos del agua a nivel mundial ya que desafortunadamente, las personas que más sufren escasez de agua o precariedad de acceso, contaminación del agua y mal saneamiento viven en los países con pocos o nada de recursos, donde apenas existen medios para tratar el agua y los residuos, enmarcando la gran diversidad de situaciones entre los diferentes países dentro y fuera de éstos (OEA, 2022).

México, ocupa el lugar 26 a nivel mundial con escasez hídrica alta (Kuzma *et al.*, 2023) de una lista de 164 países elaborada por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) y 25 países presentan escasez hídrica extremadamente alta. A nivel nacional y estatal, la situación varía según la región específica, algunos estados enfrentan una mayor escasez de agua debido a condiciones climáticas adversas, malas políticas de gestión o sobreexplotación de los recursos hídricos que pueden llevar a una disminución en sus niveles. El caso de la ciudad de Monterrey ha sido de los más mencionados, ya que el gobierno durante el año 2022, anunció una estrategia de tandeo de agua en algunas colonias (horario y menos presión) pidiendo a las industrias agrícolas y producción de bebidas un cede voluntario de sus concesiones (Mexiconewsdaily, 2023).

Por otra parte, S&P Global, 2023 usando datos sobre Riesgos Físicos del Cambio Climático, asignó categorías para evaluar la exposición de un sitio a diferentes riesgos climáticos incluido el estrés hídrico, donde el valor de 1 se designa como riesgo bajo y 100 como riesgo más alto, mostrando que, en esta década (2020-2030), 11 de los 32 estados han enfrentado un alto estrés hídrico (>70) siendo más susceptibles Baja California Sur y Norte, Aguascalientes en la región del Bajío y CDMX. Para el 2050, con un escenario de cambio climático de emisiones moderadas (SSP2-4.5), habría un aumento de la temperatura de 2 °C a nivel mundial y un mayor número de estados con alto estrés hídrico como Nuevo León, Tamaulipas, Coahuila, la parte norte de San Luis Potosí, la zona Bajío de Querétaro, Tlaxcala, centro de Hidalgo, Colima y Costa de Jalisco.

Hoy en día, ante una creciente problemática del sector hídrico en México, con un camino hacia un futuro

incierto o desolador, es fundamental no solamente para la sobrevivencia y conservación de la vida, sino también para los sectores económicos, sociales, energéticos, alimentarios y ecosistémicos, tener una visión sistémica de cooperación intersectorial hacia la creación y desarrollo de una nueva cultura del agua. Por ello, el presente proyecto tiene como objetivo y propósito llevar a cabo, en una primera etapa, el análisis diagnóstico de la problemática estatal del agua en el estado de Colima, que incluye una perspectiva de la población en el tema, identificación de actores clave a través de talleres, acciones, impactos y posibles colaboraciones intersectoriales, para más adelante contar con las herramientas necesarias que sostengan las bases para diseñar una política pública que acompañe a todos en la importante acción de la seguridad hídrica, y de esta manera comprender y atender los compromisos para conservarlos.

Marco teórico

En México, se ha pasado de 25.8 millones de habitantes en el año 1950 a 126 millones en el 2020 (INEGI, 2020a), en este mismo año, Colima contó con una densidad poblacional de 130 habitantes por km², ubicándose entre las 10 entidades más densamente pobladas del país. La población total es de 370,769 mujeres y 360,622 hombres dando un total de 731,391 habitantes. El 90% de la población vive en localidades urbanas y el 10% en localidades rurales (INEGI, 2020b), es decir, 1,205 localidades rurales y 21 urbanas. Colima tiene una extensión territorial de 5,627 km² equivalente al 0.3% de la superficie del país y por su tamaño ocupa el lugar 28 a nivel nacional, siendo el tercer estado más pequeño del país, se caracteriza por la importante exposición a peligros de tipo sísmico, volcánico, hidrometeorológico y antropogénico, lo que genera importantes riesgos en sectores de la población y en la infraestructura, dentro de determinadas áreas. Este crecimiento no solo es a nivel estado sino a nivel país, generando una demanda de más y mejores servicios volviéndose un reto en las instituciones de gobierno, ya que la urbanización acarrea problemas ambientales como deforestación y cambio de uso de suelo ya que prácticamente ninguna casa o zona habitacional se construye de manera sustentable acorde al paisaje que les rodea.

El organismo encargado de la gestión del agua es la Comisión Estatal del Agua de Colima (CEAC), la cual tiene como función la planeación, coordinación, regulación y supervisión de los recursos hídricos en el estado. La región hidrológica-administrativa

u organismo de cuenca a la que pertenece el estado de Colima es Lerma-Santiago, donde dos regiones hidrológicas (**Figura 1**) confluyen en el estado que son Costa de Jalisco y Armería-Coahuayana. En cuanto a los cuerpos de agua disponibles en Colima, las zonas montañosas al sur de Jalisco son cruciales, ya que se integran en su mayoría, por escurrimientos desde las zonas altas de Jalisco, que favorece a la frontera con Colima dando los altos niveles de infiltración, dando origen a los tres principales ríos del estado Marabasco, Armería y Coahuayana.

En el estado de Colima, se han firmado convenios en coordinación con el gobierno federal a través de la Comisión Nacional del Agua y los Organismos Operadores del Agua de cada municipio, que son los encargados de gestionar recursos y de llevar a cabo

acciones y obras para dotar a los colimenses de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. La CEAC realiza la construcción, rehabilitación y ampliación de infraestructura hidráulica, que ha posicionado al estado en los primeros lugares a nivel nacional en servicios de agua potable y alcantarillado, con coberturas entre el 97% y un saneamiento que alcanzó el 62.4% (CEAC, 2018). Sin embargo, el rápido crecimiento habitacional en los principales municipios ha dejado nuevos retos por alcanzar y mantener al sector hídrico, pero durante el año 2021, se habló del estado preocupante que guarda el tema del agua potable, saneamiento y alcantarillado en el estado de Colima, siendo urgente su atención para prevenir situaciones de desabasto o de falta de operatividad en los tiempos venideros (Negrete, 2022).

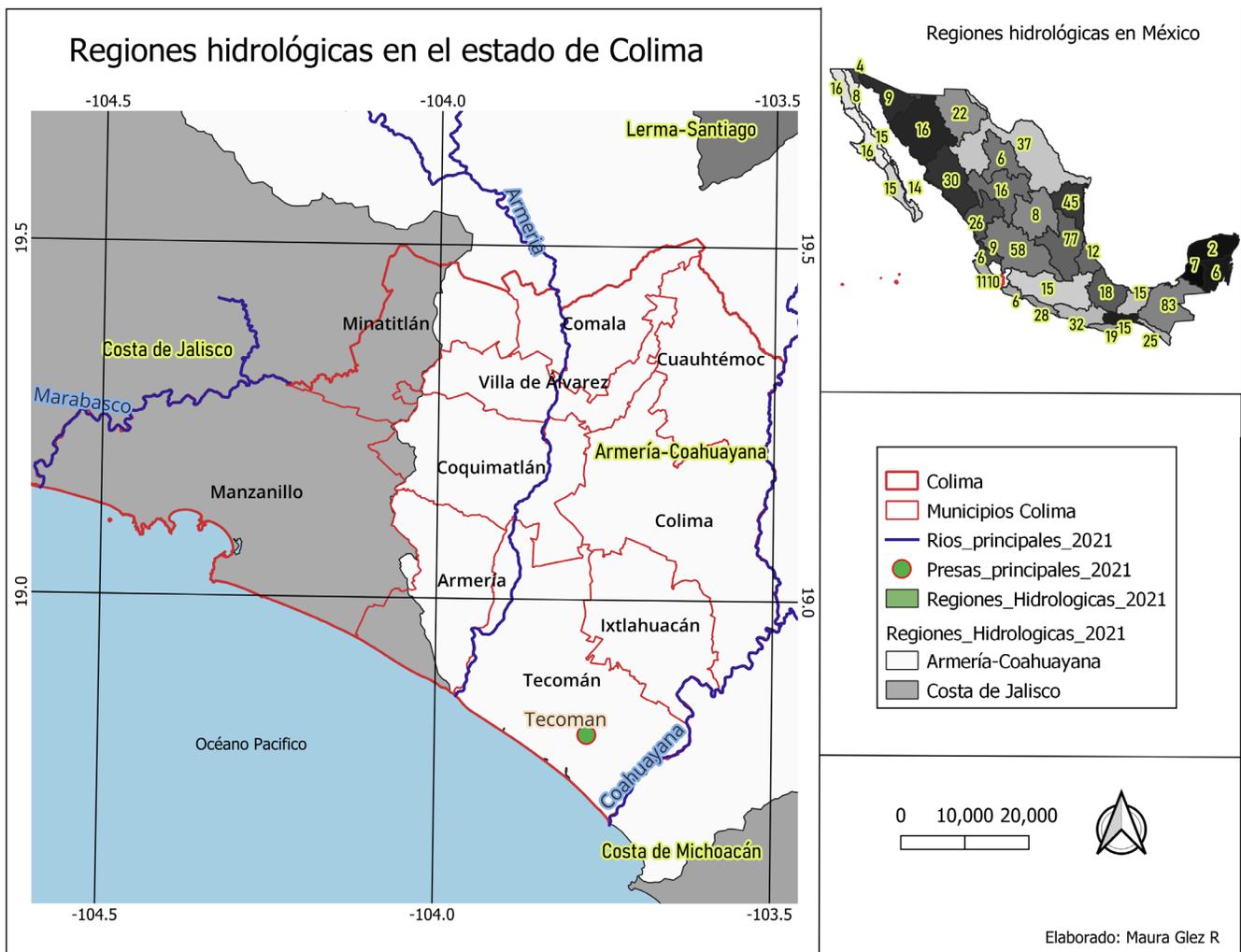


Figura 1. Regiones hidrológicas del estado de Colima y sus principales ríos. fuente: INEGI, 2022 y Sistema Nacional de Información del Agua (SINA, 2024).

En la Ciudad de Colima, a raíz de la pandemia COVID-19 del año 2020, la Comisión Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Colima y Villa de Álvarez (CIAPACOV), enfrentó serias dificultades con la disminución de ingresos en un 38% respecto al año 2019, además de la deuda con la planta de tratamiento de aguas residuales en esta zona y un incremento en el pago a la Comisión Federal de Electricidad (Rodríguez, 2022). A pesar de lo anterior, se dio prioridad para abastecer de agua a alrededor de 300 mil habitantes de la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez, ocasionando una reducción en plena pandemia y suspensión del vital líquido a los habitantes de la comunidad indígena de Zacualpan (Proceso, 2020), lugar donde se localiza el manantial, además de ocasionar molestias por parte de los habitantes de la comunidad a tal grado de cerrar y apagar las bombas para impedir el paso del agua (Gutiérrez, 2023).

Es así como el pasado 3 de julio, se abordaron temas como el incumplimiento de acuerdos entre el gobierno federal y la comunidad de Zacualpan, ya que son problemas que se han repetido en años anteriores (criterios.mx, 2022), por tal motivo, esta investigación, se aborda desde la visión donde la gente, el agua y la naturaleza son parte de un mismo sistema. Esto hace necesario que cualquier política relativa al agua incorpore una visión integral y sistémica (Guerrero Forero, 2007). Por ello, el tema del agua se está trabajando con esta perspectiva (Conahcyt México, 2023; Vargas-Madrado y Puga-Olguín, 2023), que permita encontrar enlaces de cooperación multisectorial.

Metodología

La metodología planteada, consistió en una aplicación de encuestas, ya que esta técnica es ampliamente utilizada como procedimiento de investigación dado que permite obtener y elaborar datos de modo rápido y eficaz (Casas Anguita *et al.*, 2003), tanto a la población de algunas zonas rurales como en cabeceras municipales del estado de Colima, con una mayor tendencia hacia la zona urbana. La segunda parte, se enfocó en los resultados de un primer taller de actores claves del estado, los cuales se detallan a continuación:

Las encuestas se aplicaron con carácter exploratorio, a partir de un muestreo determinístico de una muestra convencional o accidental (INEGI, 1999). Esta

aproximación consiste en recopilar datos acerca de los sujetos de estudio que resulten más accesibles y de acuerdo con el tamaño de la población de Colima el tamaño mínimo de la muestra es de 384, encuestando en este caso 467 personas.

La primera aplicación de encuestas fue mediante un proyecto financiado por el Instituto Nacional de las mujeres para impulsar la participación de las mujeres y fomentar una cultura ambiental sustentable. Las aplicaciones de las encuestas se realizaron dentro del marco de los talleres sobre cultura del agua, realizado en diferentes comunidades del estado de Colima como: Villa de Álvarez, Coquimatlán, Colima, Cuauhtémoc, Armería, Comala, Minatitlán, Tecomán, Ixtlahuacán y Manzanillo. Las encuestas se enfocaron, en una primera instancia a mujeres ya que, de acuerdo a la historia, éstas juegan un papel central en la provisión, gestión y salvaguardia del agua como señala La Asociación Mundial para el Agua (GWP, por sus siglas en inglés) en la Declaración de Dublín (GWP, 1992); sin embargo, a la hora de la aplicación de las encuestas se contempló a todos los asistentes a los talleres In-Mujeres. La pertinencia de estos talleres radica en el hecho de que el Cambio Climático Global (CCG) es el reto más grande al que se deben enfrentar los seres vivos durante el presente siglo y alude a una variación del clima en el planeta, generada por la acción exclusiva de una especie: el ser humano. Éste es producido por el proceso conocido como efecto invernadero, que provoca el llamado calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero.

En la segunda etapa de encuestas, se muestrearon a habitantes de las cabeceras municipales del estado de Colima, comunidades y en eventos del agua (ambas etapas incluyen personas entre 15 a 60 años), donde las preguntas que integran dichos cuestionarios, están basadas en estrategias de apoyo para recopilación de datos relativos a los recursos hídricos del programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), ya que este ha sido aprobado en distintas regiones.

Es importante mencionar que, para distinguir una zona rural de una urbana, se consideró la definición tomada por el INEGI, donde una población rural tiene menos de 2,500 habitantes, mientras que una zona urbana

es aquella donde viven más de 2,500 habitantes. Las preguntas planteadas fueron mejoradas en la segunda etapa, la cual fue más detallada. Una vez recopilada la información y los datos referentes al tema del agua en el estado de Colima y las opiniones de la población en general, se obtuvieron estadísticas para contar con información reciente y de fácil uso para todo tipo de interés.

Como tercer punto, se organizó un taller de actores clave del recurso hídrico en el estado de Colima, donde se invitaron a diferentes sectores de los tres niveles de gobierno, así como asociaciones civiles, principales empresas consumidoras de agua, sector académico y sector salud. Se recopilaron las ideas más relevantes discutidas dentro del taller para así generar las conclusiones de los consensos donde se trataron diversas necesidades y problemáticas constantes, la complejidad de los servicios, ventajas, debilidades y fortalezas, importancia y proyección del tema de escasez del agua en el estado de Colima para de tal manera, proponer más adelante soluciones, anteponiendo primeramente la conservación del medio ambiente.

Resultados

A partir del muestreo mediante encuestas, se obtuvo una perspectiva de la población del estado de Colima referente al tema del agua como actividades de mayor consumo de agua, saberes, opiniones, necesidades y expectativas, las cuales se describen a continuación:

Perspectiva del agua en el estado de Colima

El 43% de las personas encuestadas pertenecen al sexo femenino, un 41% al masculino y 16% omitió dicho dato, mientras que un 54% estudian en la universidad o ya cuenta con una carrera finalizada, el 22% cuenta con bachillerato, un 8% son personas con carreras técnicas, incluyendo en este caso a personas de diferentes niveles de escolaridad (Figura 2).

La mayoría de los entrevistados opina que siempre tiene agua en casa con un 70%, esto es posible ya que los resultados están enfocados a la zona urbana, sin embargo, un 27% opinó que le tandeán el agua, la cortan, no tienen servicio por las noches o solo unas horas durante el día, reducido en la respuesta de “A veces”, y un 2% definitivamente no cuenta con servicio (Figura 3).

Un 58% de las personas encuestadas opinan que

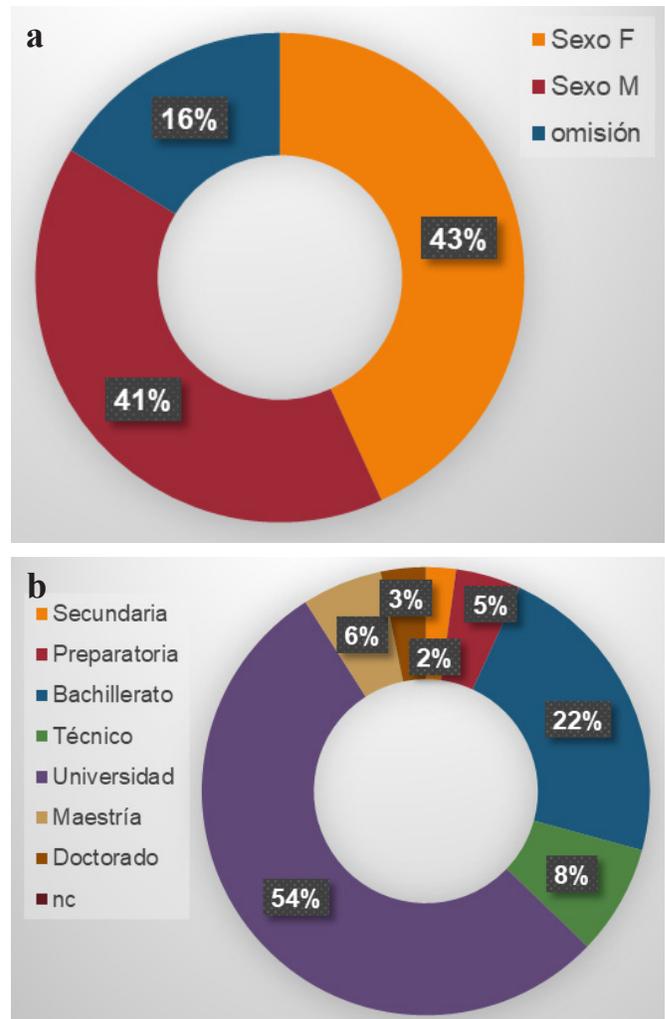


Figura 2. Sondeo de las personas encuestadas: a) Sexo y b) Escolaridad.

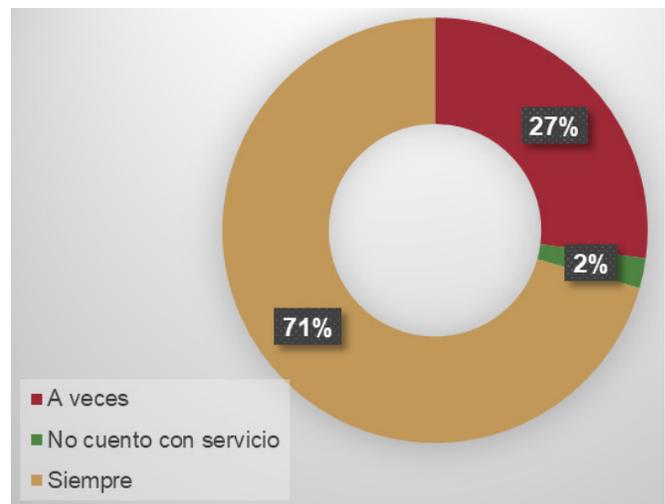


Figura 3. Opinión sobre la regularidad del servicio de agua en casa.

existe escasez de agua, mientras que un 20% opina que no existe escasez de agua en el estado, un 15% no sabe sobre el tema y un 1% opina que tal vez exista, encontrando opiniones divididas (**Figura 4**). Respecto a la respuesta de escasez, se menciona además que no hay buena distribución del recurso, aunado al crecimiento de la mancha urbana, además de que hay localidades rurales sobre todo en las partes altas del estado que no cuenta con el servicio y su método de almacenamiento se basa en la captación de lluvia y algunas personas mencionaron que existe el problema de venta de terrenos agrícolas para uso habitacional, un problema importante actualmente en el estado al haber un incremento de la zona urbana.

La población encuestada del estado de Colima está de acuerdo que, existe un problema del agua a nivel mundial, y un 64% comenta que no almacenan agua de lluvia, mientras que un 35% de las personas encuestadas captan agua de lluvia de manera improvisada; es decir, mediante cubetas, botes, tinas, baldes, tinacos, entre otros y la mayoría de las personas está dispuesta a participar en organizaciones civiles o comunitarias en su ciudad o localidad para preservar las fuentes de agua y el medio ambiente (**Figura 5a y 5b**).

Otra de las preguntas que fueron contestadas con mucha participación fue la visión futura del agua en su municipio o localidad, mencionando que no habrá un

mejor futuro a lo que estamos viviendo en este presente, donde la mayoría opina que la demanda crecerá ya que cada vez hay mayores necesidades y consumismo que repercute a nivel mundial y en nuestro medio ambiente, donde se espera que cada hogar tenga un límite de consumo y donde en general se requerirá de una mayor regulación del agua.

Resultados del taller de actores clave

Para identificar de manera multisistémica los factores que han agudizado el estrés hídrico, se realizó un taller “Diagnóstico hídrico para el estado de Colima”

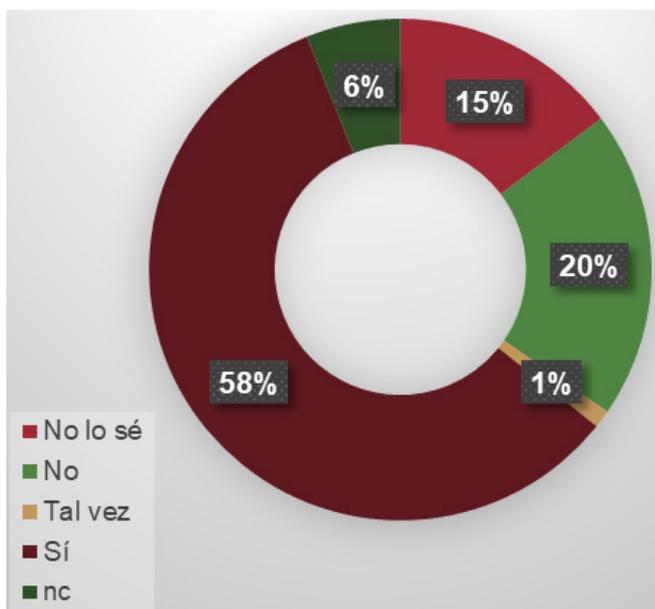


Figura 4. Opinión referente a la existencia de escasez del agua en el estado de Colima.

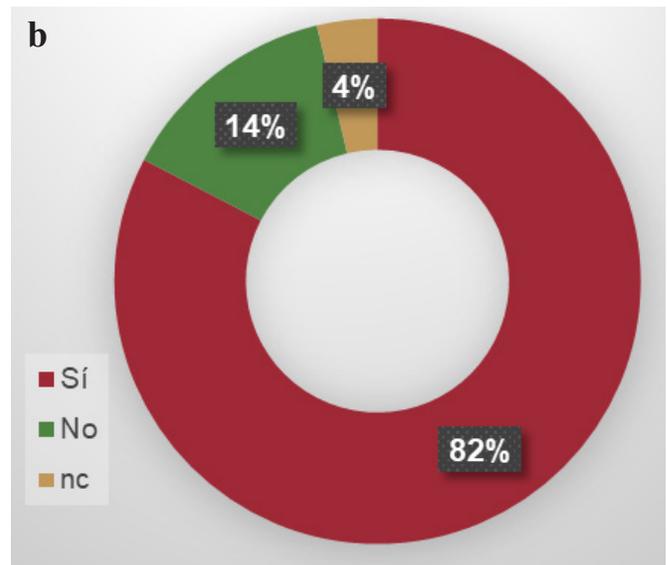
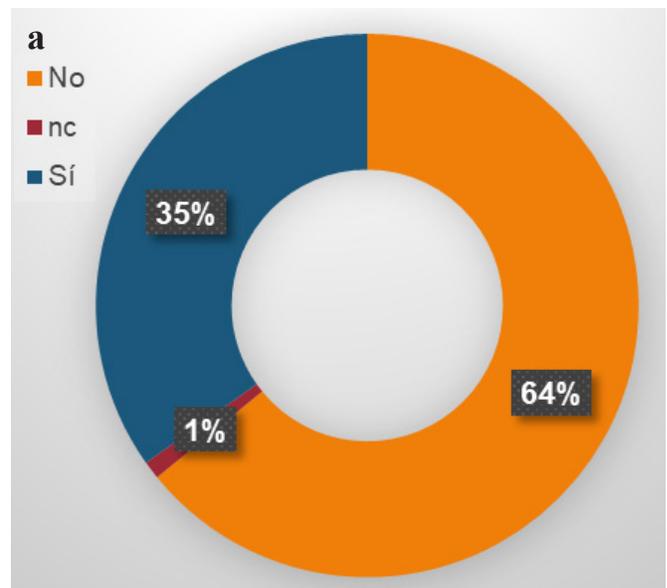


Figura 5. a) Respuestas referente a la captación o almacenamiento de agua de lluvia y **b)** disponibilidad de participar en organizaciones civiles, comunitarias en su ciudad o localidad para cuidar el agua.

donde, a partir de los análisis y lo discutido de manera multidisciplinaria, se obtuvieron e identificaron aquellos factores que de acuerdo con los asistentes son claves para fijar la atención en ellos, los cuales han estado presentes en el estado sin que se atiendan y por lo tanto siguen presentes. El árbol de problemas que se muestra a continuación es el resultado del análisis de lo discutido en el taller (**Figura 6**). Estos factores discutidos durante el taller continuarán aún sobre la mesa para analizar, acordar y de ser posible mejorar la manera de recuperar la relación intrínseca con el agua.

Dentro del taller del agua, se hablaron de diferentes estrategias que se pueden implementar para el estado de Colima como son:

1. Crear una política del agua que descentralice los usos ineficientes como albercas, campos de golf,

autolavados, distribución de revendedores de agua, entre otros) que sea de manera progresiva e incluya al sector agropecuario.

2. Ordenamiento territorial y ecológico en todos los niveles y sobre todo a nivel de cuenca.
3. Gestión Integral del agua a nivel metropolitano
4. Normatividad de materiales de construcción en desarrollos urbanos
5. Incrementar la vigilancia de pozos y tomas clandestinas
6. Invertir en la instalación de medidores de agua

Además de ello, se identificaron las principales instituciones que necesitan reforzar sus compromisos en el tema hídrico, resultando en el taller como actores claves en el estado de Colima:



Figura 6. Árbol de problemas referente a la escasez hídrica en el estado de Colima, obtenidos de manera multidisciplinaria involucrando a actores claves del agua.

Tabla 1. Principales actores corresponsables del tema hídrico en el estado de Colima.

Comisión Estatal del Agua (CEAC)
Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
Secretaría de Infraestructura, Desarrollo Urbano y Movilidad (SEIDUM)
Instituto para el Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Estado de Colima (IMADES)
Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)
Desarrollo Rural de Colima (SADER)
Secretaría de Economía
Ayuntamientos
Organismos Operadores Agua
Secretaría de Educación Pública (SEP)
Minería
Sector agropecuario
Organizaciones civiles
Ecología
Módulos de riego
Desarrollo Urbano
Catastro
Saneamiento
Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC)
Comisión Estatal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COESPRIS)
Secretaría de Salud
Secretaría de Planeación
Finanzas y Administración
Secretarías de Educación

Conclusiones

A partir de los resultados de las encuestas aplicadas, se tiene una perspectiva del tema del agua en el estado, esta incluyó personas entre 15 a 60 años, destacando que se necesita brindar más cultura, difusión e información del tema hídrico, ya que en algunos casos, hubieron respuestas de desconocimiento básico sobre todo en las personas del ámbito urbano, donde no se sabe con certeza la fuente de origen del agua que consumen, además las personas plasma un futuro incierto en el estado respecto al tema, de tal modo que una mayor información, acompañado de un cambio de visión, podrán coadyuvar a aminorar apatías, desvalorización, desinformación, desconocimientos, conflictos y violencias, ya que algunos jóvenes de entre 15 a 19 años, no mostraron interés en el tema.

Por otro lado, a pesar de la perseverancia realizada por el gobierno estatal a través de la CEAC y de los municipios del estado para reforzar la infraestructura

hidráulica, el rápido crecimiento habitacional en los principales municipios de Colima, ha dejado nuevos retos al sector hídrico dada la creciente demanda y aumento para el acceso y calidad de los servicios de agua en zonas urbanas y rurales, todo esto se acentúa dado las diferencias en el abasto y demanda del agua, la contaminación, la falta de una mejor gestión, regulación y mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas son algunos de los responsables de la escasez de este recurso. Sabemos de igual modo que todos somos responsables del buen o mal uso del agua, pero hay niveles de responsabilidad de acuerdo con la opinión de los diferentes sectores que acudieron al taller de actores claves del estado.

De igual forma, las problemáticas presentes en las instituciones de gobierno son escalables, la mayoría producto del cambio de gobierno ya sea cada 6 o 3 años, lo cual deja proyectos inconclusos, falta o rotación de personal, entre otros aspectos que retrasa el avance y la mejora de iniciativas de gestión hídrica a favor de la población colimense.

La seguridad hídrica en todas las regiones con menor o mayor vulnerabilidad es producto del esfuerzo entre el gobierno federal y local, la sociedad, diferentes sectores como el privado, organizaciones nacionales, academia, institutos de investigación, comunidades rurales, grupos de defensa por el agua, entre otros, e integrar sistemáticamente los esfuerzos para solventar la demanda creciente y la escasez del agua.

Con este documento, se espera fortalecer la base de conocimientos de los recursos hídricos en el estado de Colima, contar con un instrumento de desarrollo, prevención y planeación para afrontar y atender los grandes desafíos hacia un estado sostenible y próspero, acentuados por el desarrollo futuro y sus diferentes implicaciones, y como herramienta para sensibilizar a la población en general dando a conocer los resultados de este.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por su apoyo y patrocinio para la realización de esta investigación que sigue en curso.

Referencias

- Banco Mundial (2022, octubre 3). *Un mundo con seguridad hídrica para todos*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview#>
- Casas Anguita J, Repullo Labrador JR, Donado Campos J (2003). La encuesta como técnica de investigación. Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos (I). *Atención Primaria*, 31(8), 527-538.
- CEAC (2018). *Programa Institucional 2017-2021* (No. 103; p. 45). Comisión Estatal del Agua de Colima. http://plancolima.col.gob.mx/pbrsedx/Planeacion/Programas_Institucional/dSocial.pdf
- Conahcyt México (Director) (2023, marzo 30). *Métodos transdisciplinarios para la definición y solución de los problemas del agua—Sesión 2* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=U-nPxsv4Kw>
- criterios.mx (2022, octubre 24). *Cierran zacualpenses bombeo de agua a Colima y la Villa* [Criterios.mx]. criterios.mx. <https://criterios.mx/f/cierran-zacualpenses-bombeo-de-agua-a-colima-y-la-villa>
- Guerrero Forero E (2007). *El Enfoque Ecosistémico Aplicado a la Gestión del Agua – Una Perspectiva desde América Latina* (p. 53).
- Gutiérrez H de L (2023, julio 3). *Zacualpan no tiene Centro de Salud; Indira prometió remodelarlo hace nueve meses*. <https://diarioavanzada.com.mx/?p=45805>
- GWP (1992, enero 26). *Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30961/ICWESp.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- INEGI (1999). *Guía de Diseño de la Muestra para Encuestas*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/infraestructura/aseguramiento/doc/guia_de_diseno_de_la_muestra_para_encuestas.pdf
- INEGI (2020a). *Número de habitantes. Cuéntame de México*. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
- INEGI (2020b). *Población. Rural y urbana* [Cuéntame de México]. Cuéntame de México. https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P
- Kuzma S, Saccoccia L, Chertock M (2023, agosto 16). 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress. *World Resources Institute*. <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>
- Mexiconewsdaily (2023, abril 13). Rainfall, rising reserves ease fears of repeat Monterrey water crisis. *Mexico News Daily*. <https://mexiconewsdaily.com/news/fears-of-repeat-monterrey-water-crisis-easing/>
- Negrete JR (2022, junio 27). Descartan Morena y aliados que CEAC presente su Programa Estatal de Agua Potable. *Universidad de Colima-El comentario*. <https://elcomentario.ucol.mx/descartan-morena-y-aliados-que-ceac-presente-su-programa-estatal-de-agua-potable/>
- OEA (2022, septiembre 9). *Pandemia y Derechos Humanos*. Comisión Interamericana de Derechos Humanos. https://www.oas.org/es/cidh/informes/pdfs/2023/PandemiaDDHH_ES.pdf
- ONU (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019* (p. 64). Naciones Unidas. https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf
- Proceso (2020, mayo 7). *En plena pandemia, dejan sin agua a indígenas de Zacualpan, Colima*. Proceso. <https://www.proceso.com.mx/nacional/estados/2020/5/7/en-plena-pandemia-dejan-sin-agua-indigenas-de-zacualpan-colima-242581.html>
- Rodríguez M (2022, octubre 5). Es Colima la segunda entidad con mayor número de casos de cáncer infantil. *Estacionpacifico*. <https://estacionpacifico.com/2022/10/05/es-colima-la-segunda-entidad-con-mayor-numero-de-casos-de-cancer-infantil/>
- SINA (2024). *Sistema Nacional de Información del Agua | SINA*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php>
- S&P Global (2023). *Key Themes 2023: What We're Watching | S&P Global Ratings*. <https://www.spglobal.com/ratings/en/research-insights/special-reports/key-themes-2023>
- Vargas-Madrado E, Puga-Olguín A (2023). Hacia una visión transdisciplinaria del agua: complejidad organizacional como esencia de la vida. *Diotima* 8(22):84-103.



Emergencias ante fenómenos naturales, la cultura de la prevención

Emergencies in response to natural phenomena, the culture of prevention

Humberto Iván Navarro Gómez* , María del Refugio González Sandoval , Christopher Contreras López , Jairo Armando Lozano Hernández , Jesús Emmanuel Cerón Carballo 

Área Académica de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5. Colonia Carboneras. C. P. 42184. Mineral de la Reforma, Hidalgo. México. (771)7172000 Ext. 4001.

Historial

Manuscrito recibido: 7 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 25 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Humberto Iván Navarro Gómez

e-mail: humberto_navarro@uaeh.edu.mx

ORCID: 0000-0003-2338-4863

Resumen

Los riesgos de seguridad hídrica son una amenaza crucial para alcanzar los objetivos de sostenibilidad de la agenda 2030. La vulnerabilidad de las comunidades más empobrecidas incrementa el impacto de los desastres naturales, causando daños cada vez más graves. A pesar de la existencia de atlas de riesgos, esta información no llega adecuadamente a las poblaciones más vulnerables, y no se ha fomentado una cultura sólida de prevención. Este artículo propone una metodología innovadora para involucrar a la academia y a las autoridades en la creación de una cultura organizativa dentro de las comunidades más expuestas a estos riesgos. La propuesta busca empoderar a estas poblaciones, dotándolas de herramientas para afrontar de manera más eficaz los desastres hídricos, promoviendo una mayor resiliencia y reducción de riesgos. Este enfoque interdisciplinario, centrado en la colaboración y la prevención, ofrece una nueva perspectiva sobre cómo mejorar la gestión del riesgo y mitigar los impactos futuros en zonas vulnerables.

Palabras clave: vulnerabilidad, análisis de riesgos, sostenibilidad.

Introducción

Los riesgos de seguridad hídrica constituyen la mayor amenaza para alcanzar los objetivos de sostenibilidad mundiales. De acuerdo con el atlas de mortalidad y pérdidas económicas de extremos del tiempo, clima y agua 1972-2012, en dicho periodo hubo 8,835 desastres, casi dos millones de víctimas mortales y pérdidas por 2,400 billones de dólares. En el periodo estudiado, las tormentas o crecidas de ríos causaron el 79% de los desastres, el 55% de las muertes y el 86% de las

Abstract

Water security risks pose a critical threat to achieving the sustainability goals of the 2030 Agenda. The vulnerability of impoverished communities exacerbates the impact of natural disasters, causing increasingly severe damage. Although there are atlases of risks, this information does not adequately reach to the most vulnerable populations, and a strong culture of prevention has not been established. This article presents an innovative methodology that aims to engage academia and authorities in fostering an organizational culture within the most exposed communities to these risks. The proposal seeks to empower these populations by equipping them with tools to face in better way to water-related disasters, promoting resilience and reducing the risks. This interdisciplinary and collaborative approach offers a fresh perspective on improving risk management and mitigating future impacts in vulnerable areas. By emphasizing the prevention and community involvement, the methodology provides a critical framework for addressing the challenges of water security in high-risk regions.

Keywords: vulnerability, risk analysis, sustainability.

pérdidas económicas. Las graves sequías que afectaron al continente africano (1975 y 1983-1984), provocaron un 35% de muertes.

El riesgo es la probabilidad de perder el bien expuesto frente a un peligro dado. Es una función del peligro, la vulnerabilidad y la exposición. Los atlas de riesgos son sistemas que integran información sobre fenómenos perturbadores a los que está expuesta una comunidad y su entorno. Un atlas de riesgos es una plataforma informática apoyada en sistemas de información

geográfica y bases de datos. Su estructura puede integrarse de la siguiente forma:

- Mapas de peligros por fenómenos perturbadores;
- Mapas de susceptibilidad;
- Inventario de bienes expuestos;
- Inventario de vulnerabilidades;
- Mapas de riesgos;
- Escenarios de riesgos.

En resumen, el atlas de riesgos es un instrumento que permite establecer estrategias de prevención, reducción y mitigación de riesgos y siniestros. Debe servir para informar a la población sobre los peligros a los que está expuesta y, a las autoridades, para generar un esquema normativo para la toma de actitudes responsables en la planeación y desarrollo de los asentamientos humanos. Por tanto, un atlas de riesgos debe de funcionar como un sistema para la toma oportuna de decisiones.

La prevención de daños pasa por el análisis de la vulnerabilidad, de las causas y efectos para dimensionar el impacto. Esta vulnerabilidad se manifiesta como la incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre (UNISDR, 2004). También se define como las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que incrementan la susceptibilidad de un individuo, una comunidad, activos o sistemas a los impactos de los riesgos. Además, la vulnerabilidad está ligada a los procesos sociales que se desarrollan en las áreas propensas y usualmente tiene que ver con la fragilidad, la susceptibilidad o la falta de resiliencia de la población ante amenazas de diferente índole. En este sentido, los desastres son eventos socioambientales cuya materialización es el resultado de la construcción social del riesgo (BID e IDEA UN, 2005).

Es por ello por lo que en la presente propuesta se muestra el desarrollo de una metodología para la realización de estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos, tomando como modelo la Zona Metropolitana de Pachuca, ubicada en el Estado de Hidalgo, México.

La Zona Metropolitana de Pachuca como caso de estudio

La Zona Metropolitana de Pachuca de Soto abarca una superficie de 1,196.5 km², incluyendo dentro de ella a los municipios de Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Mineral del Monte, San Agustín Tlaxiaca, Epazoyucan, Zapotlán de Juárez y Zempoala. El crecimiento

constante de la Zona Metropolitana ha sido concentrado hacia el Sur, además del Este y el Oeste; haciendo que los límites municipales entre Pachuca y el resto de los municipios que conforman la Zona Metropolitana, sea cada vez menos evidente. En 2020, sólo en Pachuca de Soto, la población ascendió a 314,331 habitantes (47.6% hombres y 52.4% mujeres), que comparado con el año 2010, representa un crecimiento de 17.3%.

Este crecimiento desmesurado y la urbanización desordenada, aunados a los riesgos ya existentes como la presencia de socavones, tiros mineros y fallas; ha generado el incremento en la probabilidad de ocurrencia de inundaciones, subsidencias, hundimientos súbitos y deslizamientos.

Uno de los principales cauces de la ciudad es el Río de las Avenidas, cuyo principal antecedente de inundación ocurrió el 24 de junio de 1949. En esa fecha, una fuerte tromba generó grandes volúmenes de escurrimiento hacia la ciudad a través de este cauce. En ese entonces, la falta de mantenimiento junto con el arrastre de materiales provocó una reducción de la capacidad de conducción y posteriormente su desbordamiento. Los niveles del agua alcanzados fueron superiores a los 2 metros de altura, con daños en pérdidas humanas y varios desaparecidos (CENAPRED, 2019).

Un caso más reciente se registró entre el 4 y 5 de octubre de 1999, cuando la parte alledaña del Río de las Avenidas, a la altura de la localidad del Venado, se convirtió en una laguna y, a pesar de ello, en años posteriores se asentaron en esta zona los fraccionamientos de Los Tuzos, Magisterio, Venados, Tulipanes, Forjadores, Cipreses, Quinta Bonita, La Colonia, sin realizar obras de mitigación pluvial adecuadas (El Sol de Hidalgo, 2023)

De acuerdo con su geología, la Zona Metropolitana es comprendida en su basamento, por rocas mesozoicas de origen calcáreo con lutita y arenisca interestratificada. Sobre yaciendo a estas rocas, se encuentran rocas terciarias compuestas por conglomerados calcáreos mezclados con toba y derrames de lava basáltica o andesítica, denominado Grupo el Morro. Sin embargo, la mayor parte de las rocas terciarias que afloran en la Zona Metropolitana pertenecen al Grupo Pachuca, conformadas por ocho formaciones de rocas volcánicas de composición variable (rocas andesíticas, basálticas, riolíticas, dacíticas, brechas y tobas). Esas rocas han sufrido fallamientos, alteraciones hidrotermales, mineralizaciones e intrusiones de rocas intrusivas basadas principalmente en pórfido cuarcífero de grano fino y pórfido de dacita hornblendica (Geyne *et al.*, 1963). Cabe destacar que

las rocas del Grupo Pachuca están referenciadas en la carta geológica de Pachuca, mediante tres unidades diferenciadas, de la siguiente forma: Riolita-Ignimbrita (Formación Santiago), Andesita-Brecha andesítica (Formaciones Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis y Vizcaína) y Riolita-Toba Riolítica (Formaciones Cerezo y Tezuantla; Sánchez-Rojas *et al.*, 2005).

También se tiene la presencia de rocas volcánicas de composición andesítica-dacítica (formación Zumate), andesita-basalto (Formación San Cristóbal) y riolítica (Formación Navajas); intercaladas con tobas, brecha o lahares. Las rocas cuaternarias comprenden principalmente a rocas volcánicas de composición traquítica (Formación Guajolote) y tobácea (Formación Cubitos); además de presentarse coluviones al pie de los cerros donde puede presentarse desprendimientos rocosos y aluviones a lo largo del valle que pueden presentar fallas que favorezcan la infiltración de agua al subsuelo y podrían reducir el escurrimiento hacia la cuenca del Río de las Avenidas.

Del análisis anterior es viable considerar que la vulnerabilidad no es permanente, por el contrario, está en constante cambio debido a las condiciones climáticas como a los cambios en la infraestructura. Ignorar los factores de prevención y la intervención ciudadana afecta en mayor grado a la población más desprotegida, la cual no se siente involucrada en el aviso oportuno y la toma de decisiones. La población es ajena a las causas verdaderas de cada tragedia y al análisis que se realiza para el diseño y la construcción de obras que permitan soluciones integrales, sistémicas que consideren los factores dinámicos de cambio del entorno tales como el crecimiento de la mancha urbana, la demanda de agua potable y generación de aguas residuales y la predicción oportuna de las condiciones meteorológicas.

A continuación, se desarrolla una propuesta de metodología para analizar la vulnerabilidad y la evaluación del riesgo de desastres hídricos.

Propuesta de metodología para estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres hídricos

En esta sección se propone una metodología estándar para la realización de estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres en las diversas regiones del Estado de Hidalgo de tal forma que se pueda capacitar

a los tomadores de decisiones de los municipios en su seguimiento y análisis ante un posible evento. El objetivo es establecer los lineamientos metodológicos para realizar estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastre por lluvias, tomando como base el análisis y la evaluación de las cuencas hidrográficas. Los resultados se presentarán a nivel estatal, municipal y local, con una escala de trabajo de 1:25000 o superior.

Las principales etapas propuestas para desarrollar la metodología son las siguientes:

- **Análisis bibliográfico o documental:** Se recopila información relacionada con la zona de estudio, como mapas, registros meteorológicos históricos, estudios geohidrológicos, sociodemográficos y sistemas de información geográfica, entre otros.
- **Trabajo de gabinete:** Se procesa y organiza la información recolectada.
- **Verificación de datos en campo:** Se realizan trabajos en terreno para validar los datos.
- **Determinación del peligro:** A través de un análisis multicriterio, se identifican las áreas de mayor peligro.
- **Análisis de vulnerabilidad:** Se realiza mediante matrices y hojas de cálculo programadas para identificar los niveles de susceptibilidad.
- **Evaluación de riesgos y zonificación:** Se clasifican las áreas según su nivel de riesgo.

Finalmente, se propone utilizar un sistema de información geográfica que integre toda la información, gestionado de manera sistémica con herramientas de inteligencia artificial, como redes neuronales, para mantenerlo actualizado. Este sistema podría conectarse con otros municipios o estados que forman parte de la cuenca hidrológica, facilitando la toma de decisiones conjunta y oportuna para reducir los riesgos a los que está expuesta la población. Además, se sugiere el desarrollo de una aplicación móvil que la población pueda descargar desde un portal municipal, estatal o federal, permitiéndoles identificar en tiempo real los niveles de riesgo en su ubicación y recibir recomendaciones preventivas o en caso de desastre.

Resultados

El análisis reportado a continuación comprende prin-

principalmente las dos primeras etapas de la metodología, de análisis bibliográfico y documental y el trabajo de gabinete. Considerando los antecedentes citados sobre la Zona Metropolitana de Pachuca, se procedió al trabajo de gabinete, analizando la información del portal de INEGI y otros sistemas de información geográfica.

En la **Figura 1** se muestran las isoyetas de precipitación promedio, en el periodo de mayo a octubre, de la Zona Metropolitana de Pachuca; observándose que la precipitación promedio en los meses más lluviosos, abarca en un rango de 400 mm a 550 mm.

La geología de la Zona Metropolitana de Pachuca está basada en rocas ígneas extrusivas de composiciones félsica y máfica y el tipo de suelo es del tipo phaeozem háplico que, por esta razón, y de acuerdo con la **Figura 2**, se presenta una mayor escorrentía en la parte norte y oriente, donde se tiene una escorrentía de 10 a 20% del

total de agua precipitada.

El resultado es una zona de pobre infiltración y una red hidrológica con poca capacidad. Por lo que en esta zona y, en este periodo, se presentan la mayoría de los episodios de inundaciones que, aunados a una urbanización con una planeación deficiente, genera el incremento del riesgo. En otras palabras, esta es el área de mayor riesgo de avenidas torrenciales en la zona urbana, en donde la deforestación continuada agrava la poca retención del agua por el suelo y, por ende, se generan escurrimientos con corto tiempo de concentración, pero con caudales temporales que rebasan la capacidad de conducción de torrentes, arroyos, río y canales existentes.

De este modo, en caso de presentarse una precipitación mayor de 60 mm, la escorrentía al bajar de la Sierra de Pachuca satura la cuenca del Río de las Avenidas, generando un grave riesgo de inundaciones dentro del

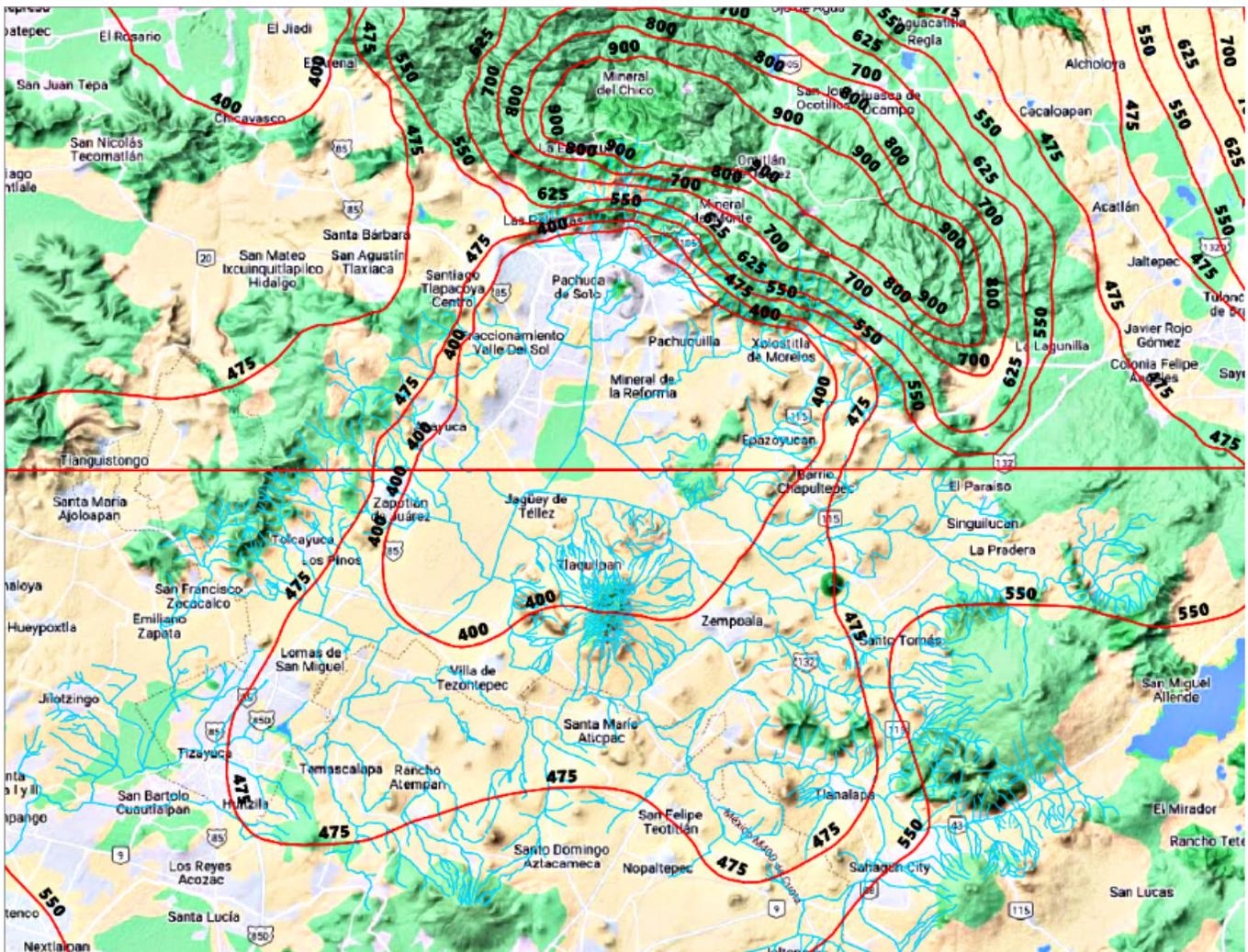


Figura 1. Precipitación Promedio en la Zona Metropolitana de Pachuca durante los meses de mayo a octubre.

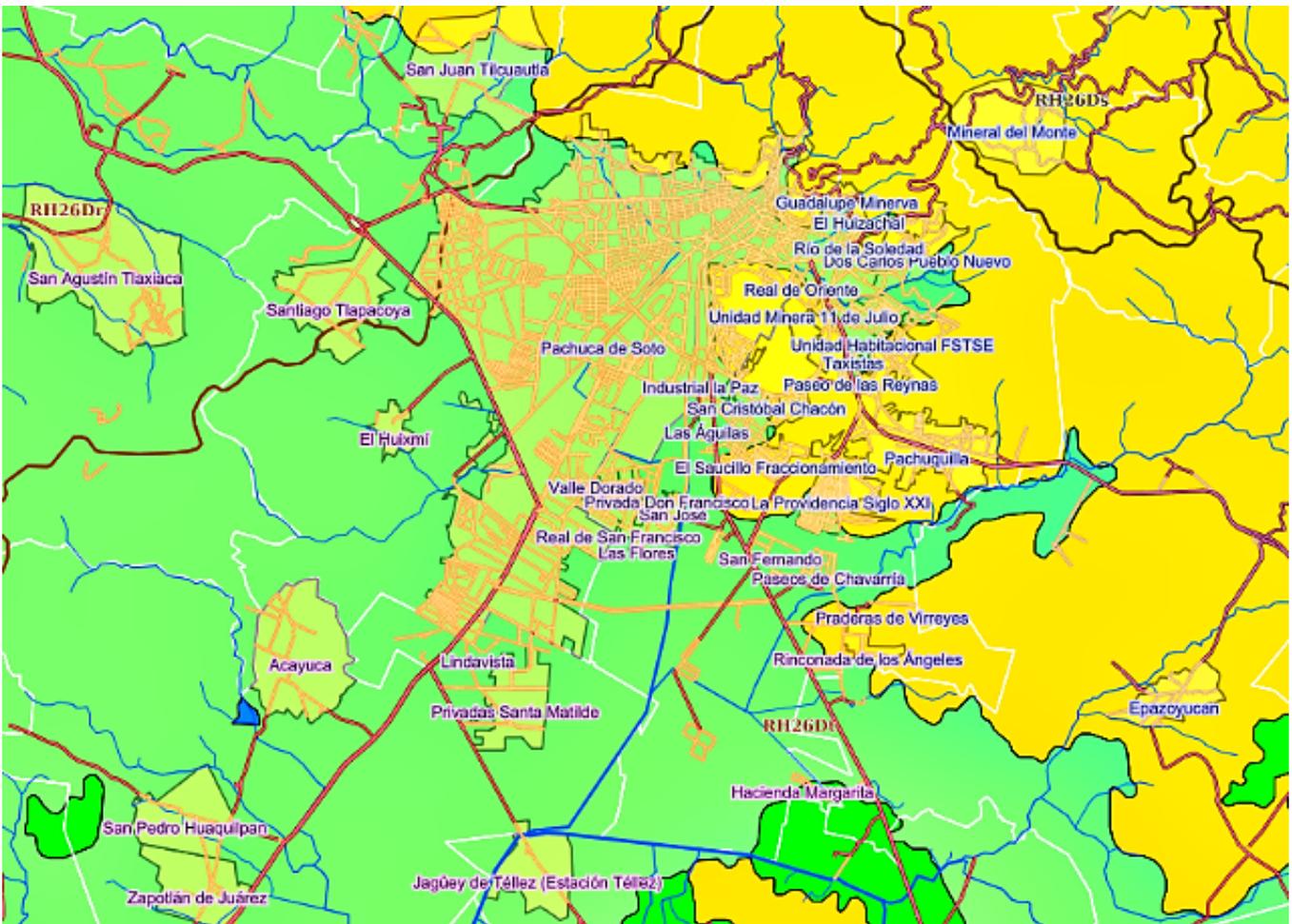


Figura 2. Coeficiente de escurrimiento, en la Zona Metropolitana de Pachuca. Color verde coeficiente de escurrimiento de 5 a 10%, color amarillo brillante coeficiente de escurrimiento de 10 a 20%.

pie de monte y en su recorrido hacia el sur de la Zona Metropolitana. Adicionalmente, y dentro del valle, se encuentran zonas de una menor escorrentía, dominando el régimen de 5 a 10% de escorrentía que, en conjunción a una planeación urbana desordenada, ha generado mayores problemáticas de inundaciones puntuales, siendo afectadas las colonias más cercanas al pie de monte, debido a la orografía que presenta en la parte norte y oriente; además de las colonias al Sur.

La **Figura 3** muestra las isoyetas de precipitación promedio, en el periodo de noviembre a abril, con un promedio de 100 mm, de la Zona Metropolitana de Pachuca. Lo que redunda en escurrimientos de niveles menores y el peligro de establecerse en las zonas se incrementa al olvidarse por la gente que el sistema climático, en los meses de mayo a octubre, volverá a amenazar la zona con posibles inundaciones.

En la **Figura 4**, se muestra que, para un periodo de

retorno de 25 años y una acumulación de una hora, la precipitación promedio es de 45 mm en la mayor parte de la Zona Metropolitana. En la región noroeste, debido a la proximidad con la Sierra de Pachuca, se observa una precipitación significativa, ya que esta área no está influenciada por vientos predominantes. En contraste, en la zona noreste, también se registra abundante precipitación proveniente de la Sierra de Pachuca. Sin embargo, la combinación con rachas de viento predominantes de más de 75 kph genera que la precipitación en esa área se extienda hacia el oriente y sur, disminuyendo la cantidad de lluvia que proviene del noreste y equilibrando las condiciones conforme se acerca al valle.

Este comportamiento permite concluir que el riesgo de un episodio de lluvia extrema ocurre al menos cada veinte años. Como resultado, y dado el crecimiento desmedido de la Zona Metropolitana en los últimos



Figura 3. Precipitación Promedio en la Zona Metropolitana de Pachuca durante los meses de noviembre a abril.

años, se ha observado un impacto más severo de las inundaciones, especialmente en las zonas bajas y, con mayor intensidad, al sur de la región.

Por otro lado, al considerar un periodo de retorno de 50 años y una acumulación de una hora (Figura 5), se registra una precipitación promedio igual o mayor a 52 mm en la Zona Metropolitana. Bajo estas condiciones, se observará un exceso de precipitación en la parte alta de la zona, lo que genera una sobrecarga en la cuenca del Río de las Avenidas. A medida que el río desciende desde la Sierra de Pachuca en pendiente, su velocidad aumenta, lo que puede ocasionar más daños, especialmente considerando el crecimiento desmedido y sin planeación que ha ocurrido en la región.

Este crecimiento se ha dado en toda la Zona Metropolitana, con un mayor impacto en la parte norte. Aunque en los últimos diez años se han intentado

frenar los asentamientos irregulares sobre la Sierra de Pachuca, el problema persiste. Desafortunadamente, sin un análisis adecuado para evitar estas situaciones, los nuevos desarrollos residenciales se han desplazado hacia el sur, donde se enfrentan a otros problemas que también requieren soluciones urgentes. Si la tendencia de crecimiento continúa, es probable que en los próximos años se presenten inundaciones como las ocurridas en 1949 y 1999, con un alto riesgo de pérdidas significativas.

En la Figura 6, se observa que, en un periodo de retorno de 100 años y para una acumulación de una hora, se registra una precipitación promedio igual o mayor a 58 mm en toda la Zona Metropolitana. Este dato demuestra una mayor probabilidad de riesgo, como se ha señalado en los periodos de retorno previamente descritos.

Hace cien años, la ciudad de Pachuca se limitaba

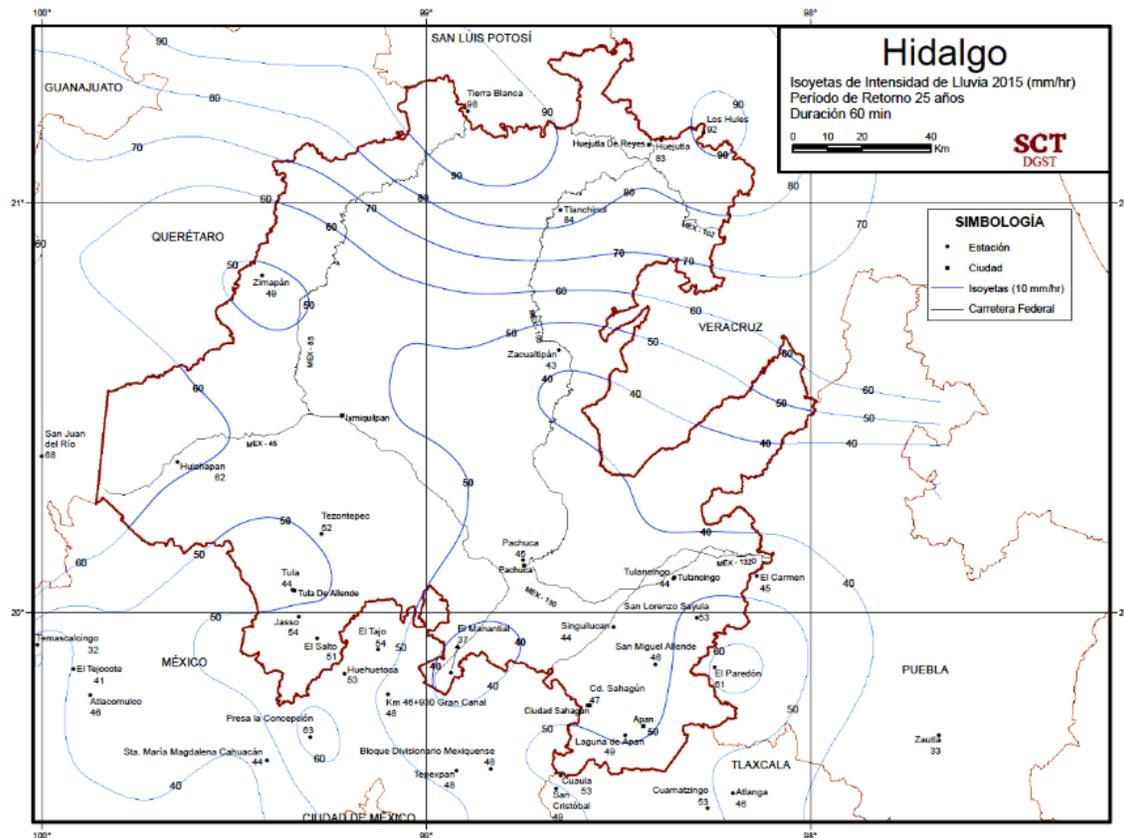


Figura 4. Precipitación acumulada en una hora, en el Estado de Hidalgo. Periodo de retorno de 25 años.

principalmente a su porción norte, que abarcaba aproximadamente 2.2 km² de superficie y contaba con una vasta área para la recarga del sistema acuífero. Sin embargo, este panorama ha cambiado drásticamente debido a la urbanización acelerada y mal planificada. Como consecuencia, en los últimos años las inundaciones han sido frecuentes, lo que apenas constituye un preludio de lo que podría ocurrir si no se toman medidas. Es imperativo desarrollar políticas adecuadas para contener el crecimiento urbano descontrolado, además de implementar proyectos que minimicen el riesgo de inundaciones y aumenten la resiliencia de la Zona Metropolitana.

Discusión

De acuerdo con el análisis del apartado anterior, la Zona Metropolitana de Pachuca presenta un alto riesgo de presentarse lluvias extremas, las cuales son definidas como lluvias mayores a 60 mm, logradas en el transcurso de una hora. El mayor riesgo de lluvias extremas se encuentra entre las zonas norte y oriente de la Zona Metropolitana, principalmente por su cercanía a

la Sierra de Pachuca. Sin embargo, de acuerdo con los atlas de riesgos, se disminuye su riesgo conforme entra en el valle.

Ya sea en los atlas de riesgos de Pachuca y Mineral de la Reforma, o de acuerdo con la metodología aplicada en este trabajo, se puede observar que la tendencia de acuerdo a los periodos de retorno genera que se considere un alto riesgo de inundación, el cual se ha presentado de forma cíclica a lo largo de los años. Este comportamiento cíclico, se ha constatado en las inundaciones de 1949 y 1999; siendo una llamada de atención, para poder predecir que, en los próximos treinta años, pueden presentarse con una frecuencia mayor, y por ende con una magnitud mayor.

Este comportamiento de crecimiento también ha generado problemáticas, que no sólo quedan en las inundaciones; sino también se han observado en subsidencias, como la observada en las inmediaciones de la colonia “La Minerva”, a partir del colapso de roca feldespática, correspondiente a un pie de columna, dentro de un socavón de mina.

Considerando que la parte norte de la Zona

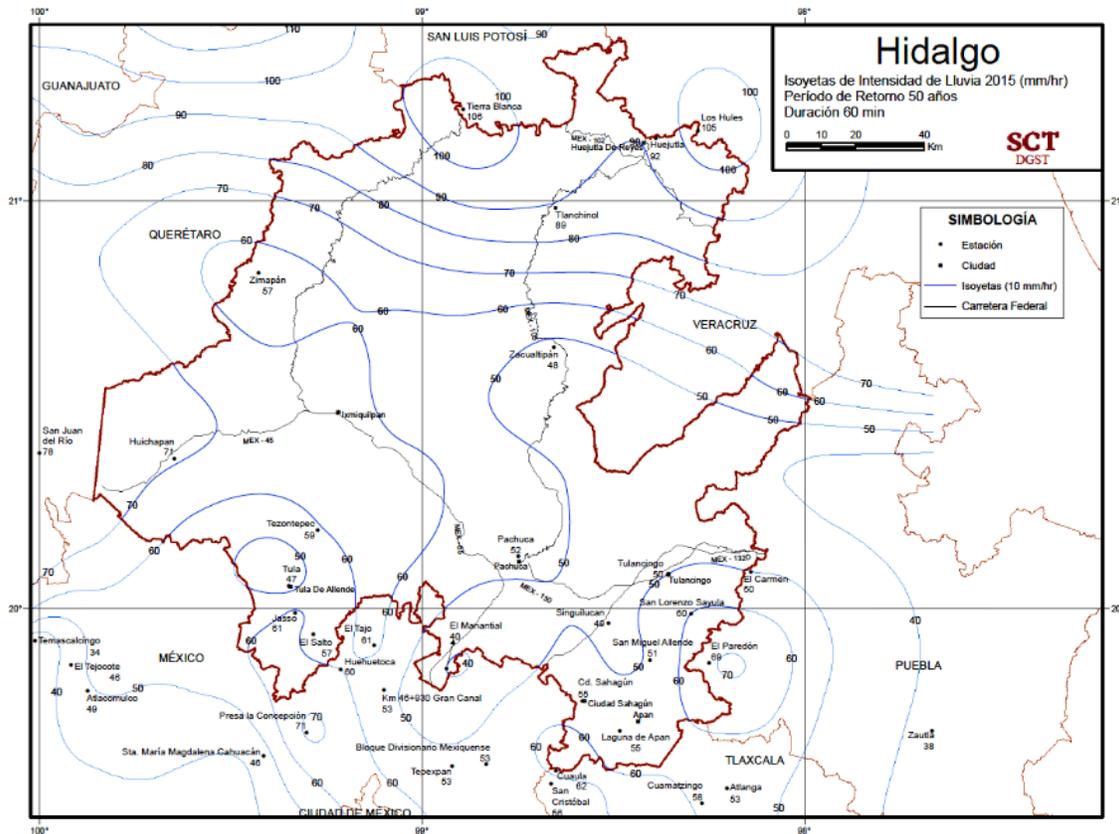


Figura 5. Precipitación acumulada en una hora, en el Estado de Hidalgo. Periodo de retorno de 50 años.

Metropolitana de Pachuca está flanqueada por la Sierra de Pachuca, y sobre ella se han desarrollado algunos barrios y colonias, sin tomar en cuenta los riesgos; por ello también se puede presentar riesgos concernientes a derrumbes y subsidencias. Además, en el caso de las subsidencias, los factores que ayudan a su propagación son que en la mayoría de la Zona Metropolitana se encuentran los túneles de antiguas minas; y aunado a las extracciones masivas de agua a partir del Acuífero Cuautitlán-Pachuca, pueden generar que esta problemática sea cada vez más crítica.

Este panorama que se presenta favorece otro factor de riesgo en las escorrentías fuera del cauce del Río de las Avenidas o sus afluentes, y cada vez más comúnmente, a través de las vías terrestres. Con ello se ha llevado a que, al descender de la Sierra de Pachuca hacia el pie de monte, se pueda llegar a generar erosión hídrica, agravando las inundaciones por el azolve de los sistemas de captación pluvial.

Como ya se indicó anteriormente, son múltiples los factores de riesgo que, al presentarse una urbanización descuidada, pueden provocar mayormente problemas

y pocas soluciones. Actualmente, se han llevado los desarrollos urbanos y residenciales, hacia el sur. Está también en proceso la actualización municipal del atlas de riesgos de Pachuca, pero de seguirse las mismas políticas, se estima que la recarga sea menor, hacia un sistema acuífero cada vez más depauperado. Con ello el riesgo de inundaciones y subsidencias es mayor, especialmente en esta zona y al norte-oriente de la Zona Metropolitana.

Conclusiones

Las máximas avenidas, como ha sido documentado en múltiples ocasiones, se concentran temporalmente entre los meses de mayo y octubre, afectando principalmente el sector noreste de la Zona Metropolitana de Pachuca. La continua deforestación en esta área ha reducido drásticamente la capacidad de retención de agua en el suelo, lo que resulta en escurrimientos con tiempos de concentración cortos y caudales temporales que superan la capacidad de conducción de los torrentes, arroyos, ríos y canales existentes. La combinación de esta escasa infiltración y una red hidrológica deficiente, junto con una

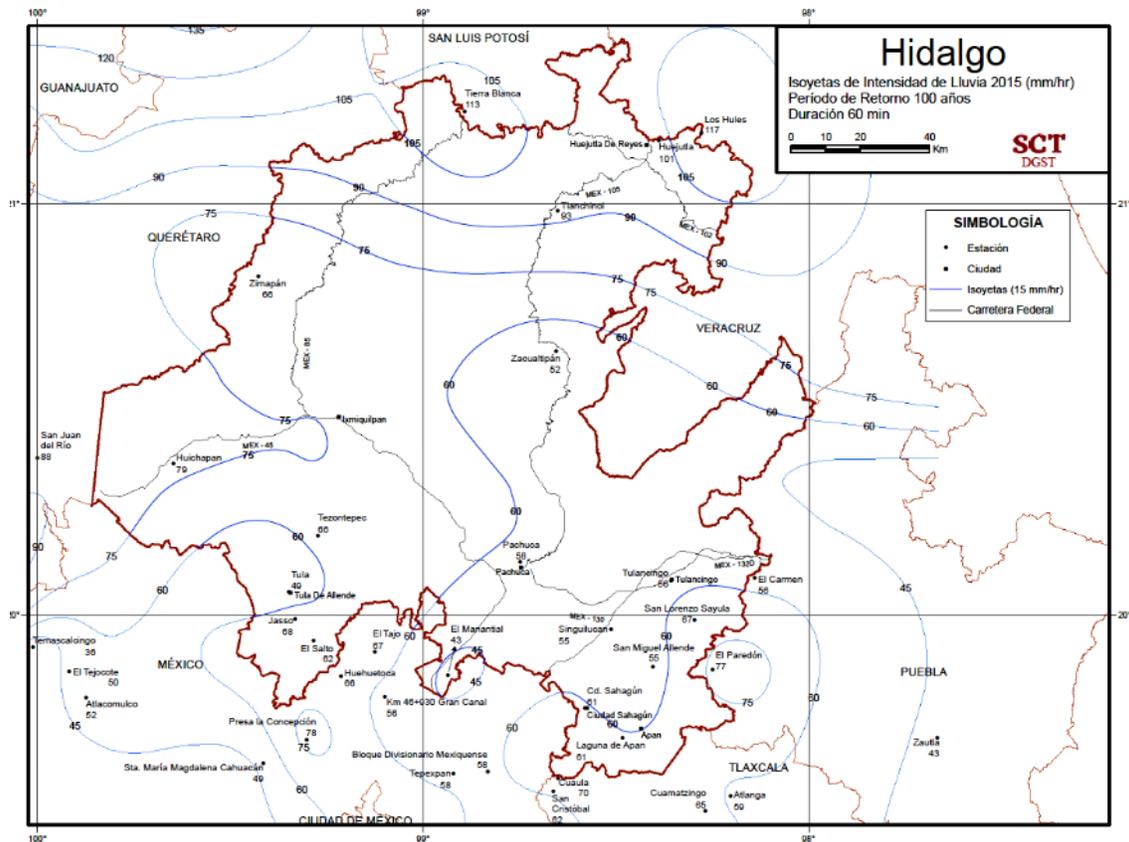


Figura 6. Precipitación acumulada en una hora, en el Estado de Hidalgo. Período de retorno de 100 años.

urbanización mal planificada, ha elevado significativamente el riesgo de inundaciones, así como la posibilidad de subsidencias, desprendimientos de rocas y erosión hídrica. Estos factores han agravado las vulnerabilidades de la región, requiriendo atención inmediata.

En eventos de precipitaciones superiores a 60 mm, la escorrentía proveniente de la Sierra de Pachuca sobrecarga rápidamente la cuenca del Río de las Avenidas, creando un alto riesgo de inundaciones, especialmente en las áreas cercanas al pie de monte y en su recorrido hacia el sur de la Zona Metropolitana. Las zonas urbanas afectadas, donde se observa una menor capacidad de escorrentía, sumadas a una planeación urbana desorganizada, se enfrentan a problemas de inundaciones puntuales, afectando de manera crítica a las colonias situadas en el norte y oriente, así como en el sur de la región.

El análisis de los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años añade una capa de complejidad al problema, destacando el incremento del riesgo en la zona norponiente, lo que sobrecarga aún más la cuenca del Río de las Avenidas (CENAPRED, 2019). La falta de

un análisis preventivo integral y la ausencia de medidas correctivas han permitido que estas condiciones persistan, lo que eleva la probabilidad de que se presenten inundaciones similares a las ocurridas en 1949 y 1999, pero con un mayor potencial de pérdidas humanas y materiales debido al crecimiento descontrolado.

El análisis presentado en esta investigación, sumado a los antecedentes históricos de inundaciones en Pachuca, subraya la urgente necesidad de establecer planes de acción claros para la población ante la inminente amenaza de nuevas inundaciones. Es fundamental implementar medidas preventivas, como campañas de concientización pública para evitar el azolvamiento de los sistemas pluviales, y promover la identificación comunitaria de zonas de riesgo. Entre las soluciones sugeridas se incluyen la cosecha de agua de lluvia y la mejora del sistema de alcantarillado, separando los sistemas sanitarios de los pluviales, con el fin de reducir el riesgo de colapsos durante eventos de lluvia extrema.

Finalmente, es imprescindible desarrollar planes de emergencia que contemplen un enfoque de

infraestructura resiliente frente a las inundaciones. Este tema adquiere mayor relevancia ante la proyección de las autoridades estatales, que estiman que la Zona Metropolitana de Pachuca crecerá de 670 mil a 1.5 millones de habitantes para el año 2050, y de 197 mil a casi 450 mil viviendas. Estas cifras demuestran la urgencia de actualizar los instrumentos de planeación de los municipios, como elementos clave para garantizar un crecimiento urbano sostenible y mitigar los riesgos asociados a este desarrollo. Si no se toman medidas inmediatas, la vulnerabilidad de la región aumentará de manera exponencial, lo que derivará en un escenario de riesgo aún más complejo y devastador.

Referencias

- Banco Interamericano de Desarrollo, Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia (2005). Indicadores de riesgo de desastre y de gestión de riesgo. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Indicadores-de-riesgo-de-desastre-y-de-gesti%C3%B3n-de-riesgo.pdf> [consultado el 20 de julio de 2023].
- Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED (2019). 70 años de la gran inundación en Pachuca, Hidalgo. Centro Nacional de Prevención de Desastres, 28 de junio de 2019, <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/70-anos-de-la-gran-inundacion-en-pachuca-hidalgo> [consultado el 26 de julio de 2023].
- González A (2023). Inundaciones en Pachuca: estas son las zonas de mayor riesgo. El Sol de Hidalgo, 23 de mayo de 2023, <https://www.elsoldehidalgo.com.mx/local/inundaciones-en-pachuca-estas-son-las-zonas-de-mayor-riesgo-10139758.html>, [consultado el 27 de julio de 2023].
- Geyne AR, Fries CJ, Segerstrom K, Black RF, Wilson IF (1963). Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México. Consejo de Recursos Minerales. http://mapserver.sgm.gob.mx/Publicaciones/ColeccionesHistoricasWeb/T131963GEAR0002_01.PDF [consultado el 22 de julio de 2023].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2023). Simulador de Flujos de Agua de cuencas Hidrográficas (SIATL). https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/ [consultado el 31 de julio de 2023].
- Sánchez-Rojas LE, Arredondo-Mendoza JA, Cardoso-Vázquez EA (2005). Carta Geológico-Minera Pachuca, F14D81, Escala 1:50,000, Estado de Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano. Pachuca.
- TYSMAG (2023). La OMM publica el “Atlas de mortalidad y pérdidas económicas de situaciones extremas meteorológicas, climáticas y de agua 1970-2012”. <https://tysmagazine.com/la-omm-publica-el-atlas-de-mortalidad-y-perdidas-economicas-de-situaciones-extremas-meteorologicas-climaticas-y-de-agua-1970-2012/> [consultado el 31 de julio de 2023].
- UNISDR (2004). Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, “La Vulnerabilidad”. <https://www.unisdr.org/2004/campaign/booklet-spa/page8-spa.pdf> [consultado el 20 de julio de 2023].

Evaluación de las olas de calor en la Ciudad de Morelia

Evaluation of heat waves in the City of Morelia

América Olimpia Martínez Granados* , Liliana García Romero, Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Múgica S/N, C.U., 58030 Morelia, Michoacán.

Historial

Manuscrito recibido: 19 de enero de 2024
Manuscrito aceptado: 28 de octubre de 2024
Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

América Olimpia Martínez Granados
e-mail: america.martinez@umich.mx.
ORCID: 0000-0002-4351-9318

Resumen

Las olas de calor son un fenómeno climatológico de gran impacto en la sociedad y medio ambiente debido a los riesgos que representan. En el presente trabajo se evalúa su impacto en la ciudad de Morelia, ya que en los últimos años se ha presentado un aumento de la temperatura, afectando a diferentes sectores. Para la evaluación de las olas de calor, existen diferentes tipos de criterios. Con base en la información disponible, se propuso la aplicación de umbrales relativos en un periodo histórico, así como la aplicación de índices que permitieron estimar el grado de severidad en la zona de estudio. Se pudo observar que el municipio de Morelia se encuentra entre un grado muy bajo y un grado alto de severidad, existiendo un grado medio a alto en la zona sur del municipio. Por otra parte, la zona centro se encuentra a un grado muy bajo a bajo, dejando la zona norte y en este caso la ciudad de Morelia en un grado de severidad alto. Esto contribuye al conocimiento sobre las zonas con mayor incidencia para establecer medidas de mitigación o adaptación.

Palabras clave: Olas de calor, temperaturas máximas, umbrales, evaluación, Morelia.

Introducción

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM; 1993), la ola de calor es un calentamiento importante del aire, o invasión de aire muy caliente sobre una zona extensa, y suele durar desde unos días hasta algunas semanas. Las olas de calor son un fenómeno natural que puede causar graves daños en el medio ambiente y afectar la salud humana, tal como sucedió en Estados Unidos a mediados de julio de 1995, donde perecieron 830 personas, 525 en la ciudad de Chicago (Changnon *et al.*, 1996). En Europa, en el verano de 2003, se estima que

Abstract

Heat waves are a weather phenomenon with a great impact on society and the environment due to the risks it represents. This paper presents the analysis of heat waves in the city of Morelia, where in recent years there has been an increase in temperatures and this has affected different sectors. For the evaluation of heat waves, there are different types of criteria, based on the available information, the application of relative thresholds in a historical period was proposed, as well as the application of indices that allowed to characterize the heat waves, as well as estimate the degree of severity in the study area. It was observed that the municipality of Morelia is between a very low degree and a high degree of severity, with a medium to high degree in the southern area of the municipality. On the other hand, the central zone is at a very low to low degree, leaving the northern zone and in this case the city of Morelia at a high degree of severity. This contributes to knowledge about the areas with the highest incidence to establish mitigation or adaptation measures.

Keywords: Heat waves, maximum temperatures, thresholds, evaluation, Morelia.

las pérdidas de las cosechas fueron de 12.3 billones de dólares, con 35000 decesos por las elevadas temperaturas, de éstos 15000 ocurrieron en Francia, donde la mayoría fueron personas de la tercera edad (FEMA, 2006). En la península Ibérica se registraron las temperaturas más altas donde se superaron los 47 °C. Por su parte, en Portugal los incendios forestales generaron daños de alrededor de 1.6 billones de dólares. Vidal *et al.* (2010) establecen que una onda cálida es definida por un período de tres o más días cuando la temperatura excede un umbral específico. En este trabajo se analizará los

efectos de las olas de calor, las causas del aumento de su frecuencia y cómo podemos mitigar sus efectos negativos. Diversos estudios muestran que las Olas de Calor provocan un incremento de las tasas de ingresos hospitalarios y un aumento de la mortalidad, según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), las olas de calor causaron más de 166000 muertes en todo el mundo entre 1998 y 2017 (OMS, 2019). Los efectos en la salud pueden incluir golpes de calor, deshidratación, enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y daño renal, y, de acuerdo con Coppe *et al.* (2004) estos periodos cálidos, junto con la contaminación atmosférica, suponen los mayores riesgos en las áreas urbanas. Las olas de calor también incrementan la demanda de energía, como la utilizada en la refrigeración, lo que puede llevar a apagones y aumentos en los precios de la electricidad, también aumenta la demanda de agua provocando desabastecimiento y escasez del recurso.

La presente investigación tiene como objetivo principal, la evaluación de las olas de calor registradas en un periodo histórico en la ciudad de Morelia, para la obten-

ción del grado de severidad en la zona de estudio. Para ello, será necesario determinar e identificar las olas de calor en el periodo histórico, y posteriormente se caracterizarán las olas de calor identificadas y se determinará el índice de severidad, y, a partir de ellos, se elaborarán mapas de severidad para la zona de estudio.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La ciudad de Morelia, se encuentra en el municipio de Morelia, ubicado en el estado de Michoacán y cuenta con una extensión territorial aproximada de 1336 km² (Figura 1). La metodología implementada en la investigación se presenta en la Figura 2. Posteriormente se definirán con detalle cada una de las etapas.

Obtención de series de temperatura máxima y mínima

La primera etapa en la metodología consiste en la obtención de series de temperatura máxima y mínima. Las

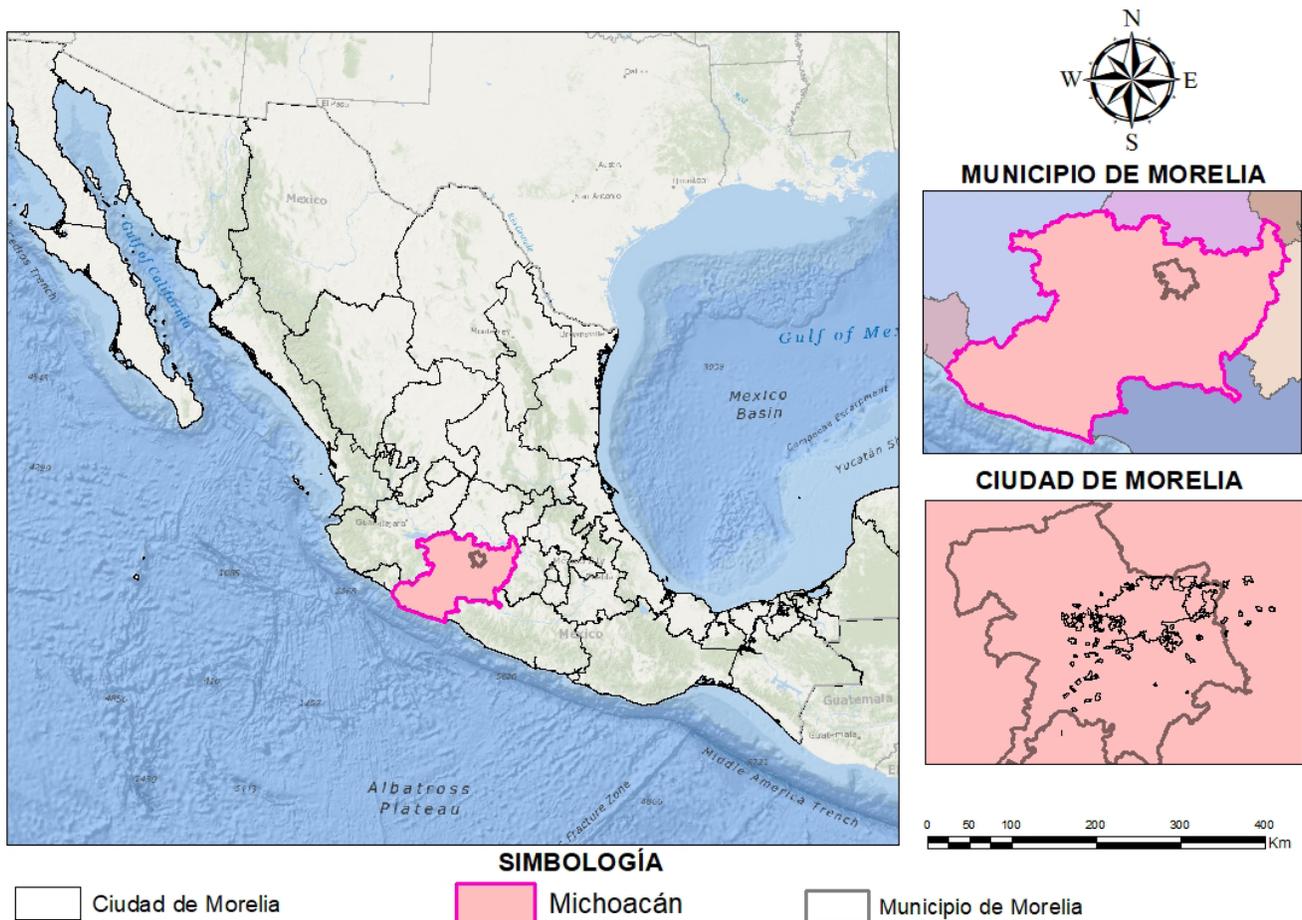


Figura 1. Localización geográfica de la ciudad de Morelia.

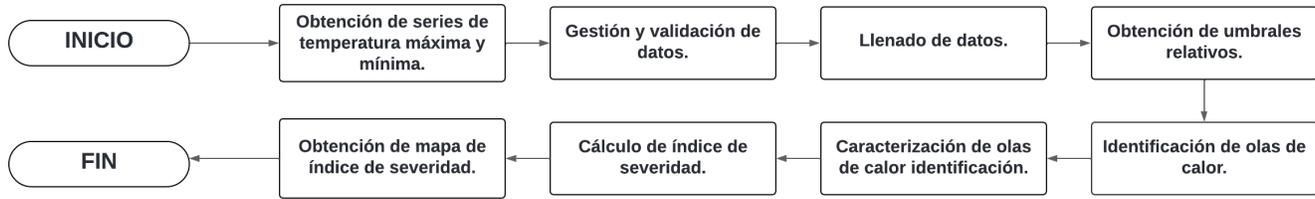


Figura 2. Diagrama metodológico general.

series provienen de las estaciones meteorológicas existentes. Para elegir las, se consideró que se cubriera toda la zona del municipio de Morelia. Las series de temperatura máxima y mínima obtenidas, provienen de la base de datos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), mismas que se descargaron a escala diaria.

Gestión y validación de datos

Para la gestión y validación de datos de temperatura, como primer filtro se obtuvo el porcentaje de vacíos de las series. Para ser utilizadas en la determinación de las olas de calor, el porcentaje de vacíos no debía exceder un 15% (Díaz, 2021). Las estaciones seleccionadas pasaron por un segundo filtro, donde se analizó el comportamiento de los datos mediante gráficas de tendencia (Herrera-Alanís, 2012) para garantizar la fiabilidad de los datos utilizados.

Estimación de datos faltantes

Para el análisis de las olas de calor, es necesario contar con series continuas de datos, por lo que fue necesario llevar a cabo la estimación de los datos faltantes de cada serie. Para este proceso, se utilizó el método de Interpolación con la Distancia Inversa Ponderada (IDW), este método se basa en que la influencia de la variable a interpolar es inversamente proporcional a la distancia entre las estaciones de apoyo. Los pesos de la función de interpolación son solamente una función de la distancia entre el punto de interés y los puntos de medición (Herrera-Alanís, 2012). La distancia al punto correspondiente, se calcula utilizando la ecuación [1].

$$W_j = \frac{F(d_{ej})}{\sum_{j=1}^n F(d_{ej})} \quad [1]$$

Donde:

$F(d_{ej})$: Función dada a la distancia.

Una forma comúnmente usada de la función F (*) es

$$F(d_{ej}) = \left[\frac{1}{d_{ej}} \right]$$

de acuerdo con lo anterior el factor de peso se escribe como se muestra en la ecuación [2].

$$W_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta} \quad [2]$$

Cuando la potencia toma valores de 1 o 2, la técnica es llamada como Interpolación de la Distancia Inversa o Interpolación del Cuadrado de la Distancia Inversa y en estos casos se puede interpolar, aunque el punto de interés no tenga datos, si en el punto de interés existen datos se puede recurrir a optimizar el exponente β (Herrera-Alanís 2012).

Obtención de umbrales relativos

Un criterio de NWS (Robinson, 2001), establece el uso de percentiles (95 y 99) en dos días consecutivos; otro criterio establece el percentil 80 tanto en temperatura máxima como en mínima para dos días consecutivos (López, 2004). Para la presente investigación se utilizó el percentil 95.

Identificación de olas de calor

Para la identificación de Olas de Calor, se buscaron las temperaturas iguales o que sobrepasaran el umbral calculado, teniendo dos o más días consecutivos (Balleste-

ros César, 2009).

Caracterización de las olas de calor

Para la caracterización de las olas de calor identificadas, se aplicaron los siguientes parámetros:

- Fecha de inicio (FI). La fecha en que inicia la ola de calor y se da en forma continua, empezando la numeración el 1 de enero hasta el 31 de diciembre del mismo año.
- Fecha de término (FT). La fecha en que termina la ola de calor, se da en forma continua, empezando el 1 de enero y terminando el 31 de diciembre del mismo año.
- Duración (D). El tiempo que dura la ola de calor, en días.
- Intensidad (I). Se define como la suma de las temperaturas divididas entre la duración de la ola de calor. Con esta definición se tienen dos intensidades, las de la serie de temperatura máxima (Imáx) y la serie de la temperatura mínima (Imín).
- Índice de intensidad (IEI). Es la suma de la temperatura modulada entre la duración de la ola de calor. Se presentan dos índices, uno en la serie de temperatura máxima y otro para la serie de temperatura mínima.
- Temperatura de alivio (TA). Se define como la diferencia entre la temperatura máxima y temperatura mínima.
- Índice de la temperatura de alivio (IETA). Es la obtenida de la serie modulada de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima.
- Temperatura máxima (TM). Es la temperatura máxima que se registra en la ola de calor. Al igual que la intensidad, se tiene una temperatura máxima en la serie de temperatura máxima (TMmáx) y otra en la serie de temperatura mínima (TMmín).

- Índice de la temperatura máxima (IETM). Es la temperatura máxima modulada.

Cálculo de índice de severidad

La severidad de la ola de calor se determina como el producto del promedio entre la intensidad máxima y mínima y la duración de la ola de calor, entre la temperatura de alivio promedio; tal como se muestra en la ecuación [3].

$$S = \frac{D \cdot (0.5 \cdot (Imáx + Imín))}{TApromedio} \tag{3}$$

Por su parte, el índice de severidad de la ola de calor (S), se determinó como el producto del promedio de la intensidad índice máxima y mínima y la duración de la ola de calor, dividida entre el índice de la temperatura de alivio promedio; tal como se muestra en la ecuación [4].

$$S = IETA \cdot (0.5 \cdot (IEImáx + IEImín)) \cdot D \tag{4}$$

Obtención de mapas de grado de severidad

La creación de mapas de grado de severidad se realizará a partir de un sistema de información geográfica (SIG), esto nos dará el resultado espacial del grado de severidad en la zona de estudio.

Resultados

Para la obtención de series de temperatura, primero se realizó la selección de estaciones, dependiendo de su ubicación geográfica; el primer criterio que se toma en cuenta, es que cubra en su totalidad al municipio de Morelia. Las estaciones seleccionadas para este trabajo fueron 10 y son las que se muestran enlistadas en la

Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones climatológicas seleccionadas.

CODIGO	Situacion	NOMBRE DE ESTACION	COORDENADAS (UTM Z14)		ELEVACION(m)	DISTANCIA AL CENTRO DE	AÑO INICIAL	AÑO FINAL	AÑOS DE SERVICIO	% VACIOS
			X	Y						
16123	Operando	Tacambaro	241715.255	2128721.625	1640	51251.509	1922	2011	89	4.78
16109	Operando	San Diego Curupatzco	270625.662	2139154.347	1444	38252.802	1922	2016	94	3.28
16136	Operando	Tzitzio	298195.137	2166417.718	1565	38410.774	1969	2017	48	7.12
16045	Operando	El Temazcal	295018.360	2173993.799	2220	34040.943	1965	2016	51	1.96
16120	Suspendida	Santiago Undameo	256661.089	2169181.628	2130	8266.860	1953	2007	54	3.24
16055	Operando	Jesus del Monte	274420.172	2174363.938	2180	13496.504	1935	2016	81	3.91
16081	Operando	Morelia	271881.605	2178482.356	1908	11073.410	1947	2017	70	2.74
16254	Operando	Teremendo	240393.521	2189402.354	2188	24523.323	1982	2017	35	6.90
16016	Operando	Carrillo Puerto	286631.216	2201397.449	1840	35917.933	1969	2015	46	10.14
16027	Operando	Cuitzeo	276241.518	2208048.732	1831	35299.969	1923	2017	94	11.70

La localización geográfica de las estaciones climatológicas seleccionadas, se muestran en la **Figura 3**.

Se analizaron las tendencias de los datos obtenidos de las estaciones climatológicas (**Figura 4**). Se analizaron un total de 10 gráficas (una por cada estación seleccionada).

Se realizó el cálculo de umbrales, a partir de un percentil 95, los cuales se presentan en la **Tabla 2**.

La caracterización, así como el cálculo de los índices de severidad, de las olas de calor identificadas se presenta en la **Tabla 3**.

Obteniendo los índices de severidad, se procedió a analizar su tendencia, en la **Figura 5** se muestra que éstos van aumentando, con respecto al tiempo.

Se identificó un mapa del grado de severidad, de acuerdo a la clasificación que propone el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). En la **Figura 6** se muestran las zonas más susceptibles ante este fenómeno.

De acuerdo con el mapa de grado de severidad ante olas de calor, en la ciudad de Morelia, se puede observar

que el municipio de Morelia se encuentra entre un grado muy bajo y un grado alto de severidad, existiendo un grado medio a alto en la zona sur del municipio. Por su parte, la zona centro se encuentra a un grado muy bajo a bajo, dejando la zona norte y en este caso la ciudad de Morelia en un grado de severidad alto.

Tabla 2. Cálculo de umbrales.

Nombre de la estación	ID de la estación	Umbral de temperatura máx	Umbral de temperatura mín
Tacambaro	16123	33	15
San Diego Curupazeo	16109	38	21
Tzitzio	16136	32	18
El Temazcal	16045	29	14
Santiago Undameo	16120	32.5	14
Jesús del Monte	16055	34	12.3
Morelia	16081	32.9	15
Teremendo	16254	32	13.1
Carrillo Puerto	16016	29	14
Cuitzeo	16027	32.4	15

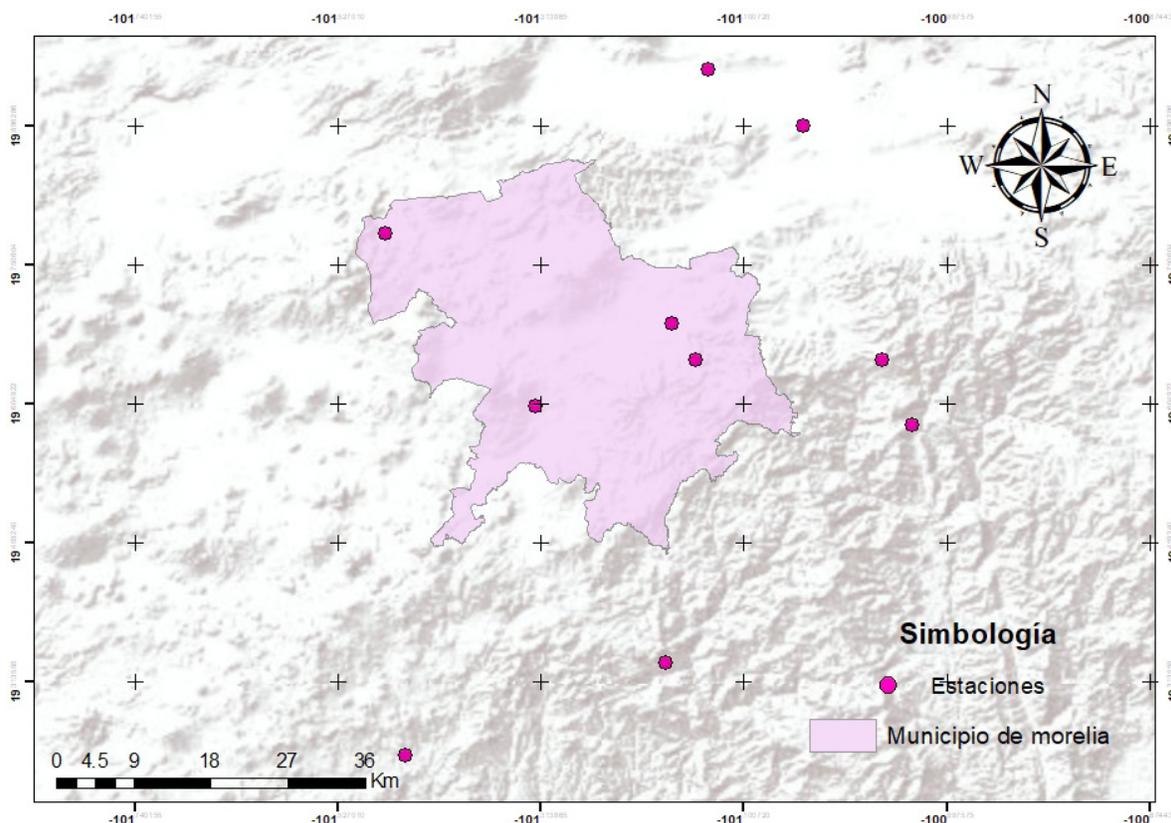


Figura 3. Estaciones seleccionadas.

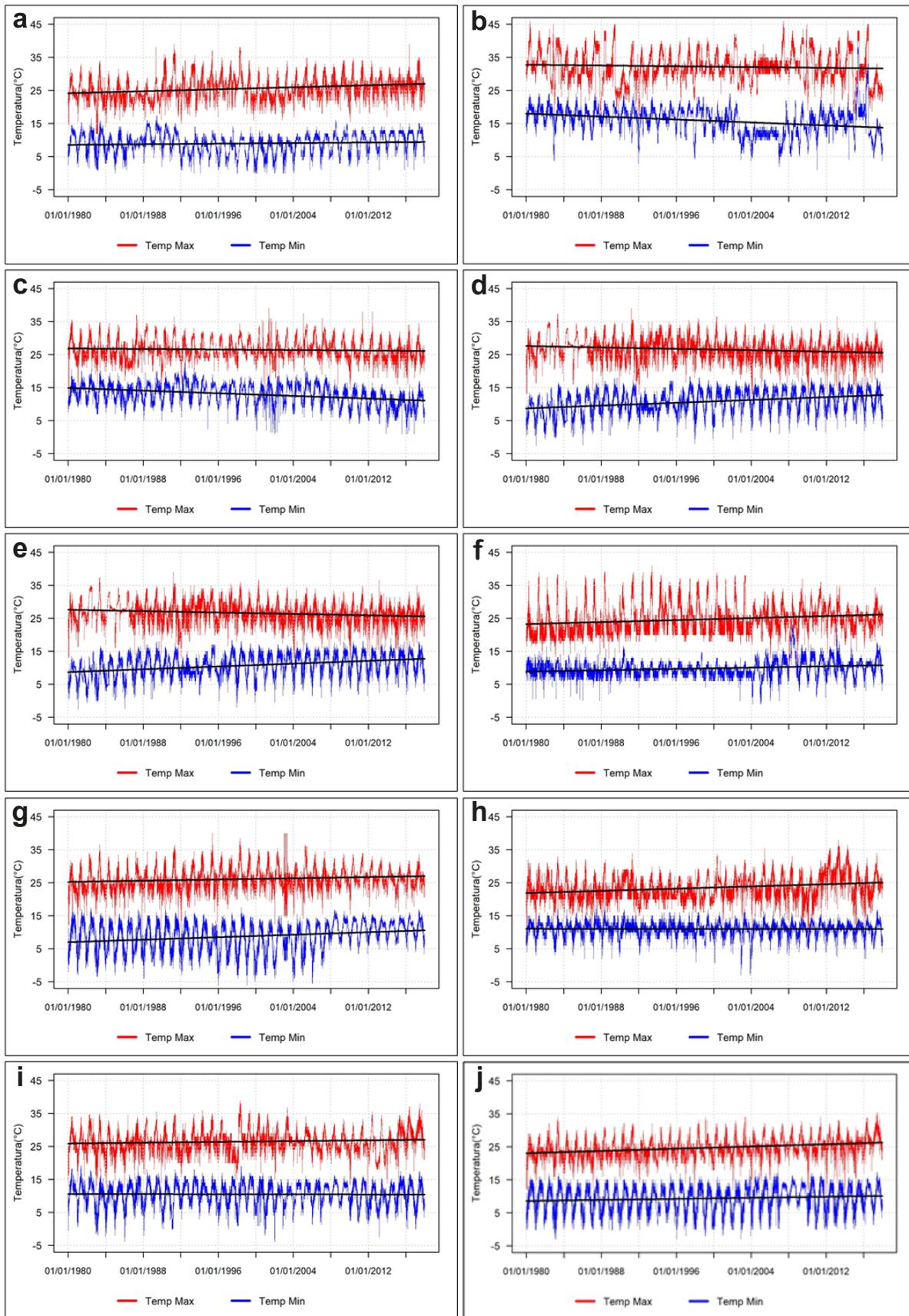


Figura 4. Análisis de tendencia de series de temperatura, a) Teremendo, b) San Diego, c) Tzitzio, d) Morelia, e) Tacámbaro, f) Jesús del Monte, g) Santiago Undameo h) Temazcal, i) Cuitzeo, j) Carrillo Puerto.

Tabla 3. Caracterización de las olas de calor.

CODIGO	NOMBRE DE ESTACION	MUNICIPIO	P95 TMAX	P95 TMIN	MMP	PT	DMP	P	TE	IEIM	IETAP	IETAM	IST	ISM
16123	Tacambaro	Tacambaro	34.00	15.54	Mayo	3.77	2.00	0.68	98.00	32.00	26.15	10.33	1111.72	117.51
16109	San Diego Curupatzco	Madero	39.00	21.00	Mayo	3.78	2.00	0.61	87.00	28.61	23.23	10.71	1043.23	134.25
16136	Tzitzio	Tzitzio	32.00	17.50	Mayo	2.86	2.00	0.76	83.00	36.00	29.20	11.63	859.61	82.06
16045	El Temazcal	Charo	29.50	14.00	Mayo	4.04	2.00	0.61	93.00	30.45	24.23	6.09	893.69	87.40
16120	Santiago Undameo	Morelia	32.00	14.46	Mayo	3.57	2.00	0.74	100.00	35.80	28.86	3.11	799.84	35.99
16055	Jesus del Monte	Morelia	33.00	14.00	Abril	3.11	2.00	0.71	84.00	38.66	27.77	9.38	1028.50	76.49
16081	Morelia	Morelia	32.00	15.50	Mayo	3.38	2.00	0.84	108.00	40.00	32.78	5.01	992.47	123.92
16254	Teremendo	Morelia	32.00	13.00	Mayo	3.68	2.00	0.66	92.00	32.84	26.06	4.28	863.62	86.77
16016	Carrillo Puerto	Alvaro Obregon	30.00	14.73	Mayo	3.53	2.00	0.89	120.00	42.70	34.30	2.75	1083.00	50.85
16027	Cuitzeo	Cuitzeo	32.50	15.00	Mayo	3.28	2.00	0.76	95.00	37.10	29.82	4.21	761.70	60.69

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, la gestión y validación de estaciones es muy importante, ya que en México no contamos con datos de calidad, por la carencia de estaciones automatizadas. Por lo anterior, el llenado de datos faltantes es de suma importancia, ya que es necesario contar con series temporales sin discontinuidades. De acuerdo con los resultados de evaluación de las olas de calor en la ciudad de Morelia, se encontró que éste fenómeno es cada vez más frecuente, causando diferentes daños a la sociedad, por lo que es urgente conocer las zonas con mayor incidencia para establecer medidas de mitigación o adaptación.

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial al programa de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos (MIRH) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (CONAHCYT).

Referencias

Changnon S, Kenneth E, Reinke B (1996). Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77:1497-1506.

Coppe C, *et al.* (2004). Health and global environmental change. Heat-waves: risks and responses, World Health Organization, 80 pp.

FEMA (2006). Excessive heat events guidebook. Washington: Environmental Protection Agency.

Jaeger EB, Seneviratne SI (2011). Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Clim Dyn* 36:1919-1939.

Herrera Alanís JL (2012). Análisis de olas de calor en República Mexicana. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.

Díaz J, López-Bueno JA (2021). Olas de frío y de calor: impacto en la salud. *Ambienta* 130:28-33.

López-Díaz JA (2004). Análisis de tendencias en las olas de calor a partir de series largas de temperatura. Instituto

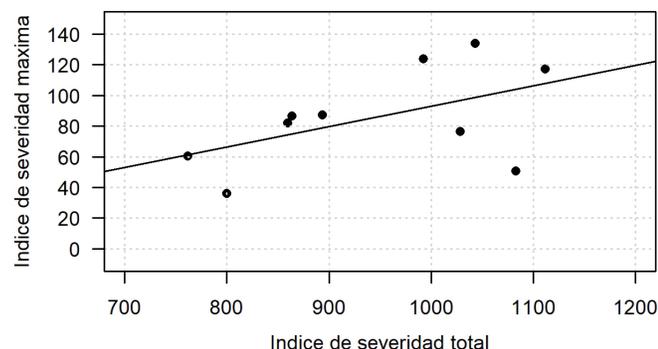


Figura 5. Análisis de severidad.

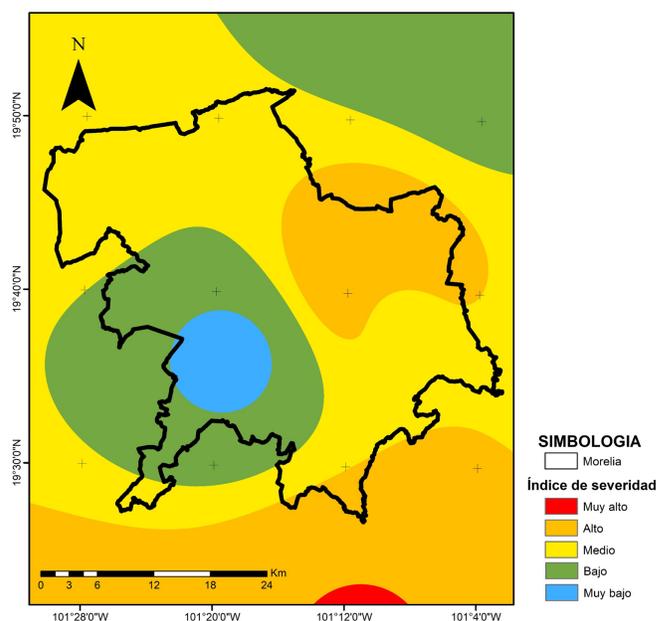


Figura 6. Grado de olas de calor en la ciudad de Morelia.

Nacional de Meteorología.

OMM (1993). Vocabulario Meteorológico Internacional. Ginebra. 1993. p. 784.

OMS (2019). Heat Health Information System (HHIS). Recuperado el 7 de mayo de 2023, de <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/heat-health-information-system>.

Robinson PJ (2001). On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 40:762-775.

Rodríguez Ballesteros C (2009). Olas de calor y de frío en España desde 1975.

Vidal R, Ortiz M (2010). Efectos de las ondas cálidas en el bienestar de la población en el sureste de México. XIX Congreso Nacional de Geografía. Villahermosa, Tabasco.



Comparativa entre los modelos de precipitación-escorrimento HBV y Témez a escala mensual. Caso de estudio Cuenca del Lago de Cuitzeo

Comparison between the HBV and TEMEZ precipitation-runoff models on a monthly scale. Case study Lake Cuitzeo Basin

Ulises Helios Méndez Vallejo, José Guadalupe García Contreras, Jesús Pardo Loaiza*, Liliana García Romero, Sonia Tatiana Sánchez Quispe

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

Historial

Manuscrito recibido: 19 de enero de 2024
Manuscrito aceptado: 31 de octubre de 2024
Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Jesús Pardo Loaiza
E-mail: jesus.pardo@umich.mx

Resumen

El presente trabajo realiza una comparativa entre los modelos precipitación-escorrimento HBV y Témez a escala mensual para determinar cuál representa mejor los escurrimientos históricos. El análisis se llevó a cabo en la cuenca del Lago de Cuitzeo, por medio del análisis de tres subcuencas a régimen natural durante el periodo de 1960 a 1990. Para la aplicación de los modelos, se utilizaron los softwares EvalHid y CalEv. Con base en los índices de bondad de ajuste calculados a partir simulaciones realizadas a escala mensual, se observó que el modelo HBV representa los caudales pequeños y grandes de manera más precisa, acercándose mejor a la media de escurrimientos. No obstante, el modelo HBV tiende a sobrestimar los caudales en algunos meses húmedos, mientras que el modelo de Témez sobrestima notablemente los escurrimientos en los meses secos. La metodología propuesta requiere pocos recursos económicos, materiales, humanos y tecnológicos, por lo que la aplicación de un modelo de precipitación en zonas con escasa información resulta eficaz para la evaluación de los recursos hídricos, a falta de métodos que consideren menos variables de análisis y que generalicen el fenómeno del ciclo hidrológico.

Palabras clave: Hidrología, modelación superficial, escurrimiento, HBV, Témez

Introducción

Los modelos sobre precipitación-escorrimento son herramientas imprescindibles en hidrología, ya que permiten simular los procesos físicos del ciclo hidrológico que ocurren en una cuenca, logrando representar la transformación de la precipitación en escurrimiento superficial y subsuperficial. Estas simulaciones son

Abstract

The present work makes a comparison between the HBV and Témez precipitation-runoff models on a monthly scale to decide which best represents the historical runoff. The analysis was conducted in the Cuitzeo Lake basin, through the analysis of three sub-basins under the natural regime during the period from 1960 to 1990. For the application of the models, the EvalHid software was used, as well as its calibrator. Based on the goodness of fit indices calculated from simulations carried out on a monthly scale, it was observed that the HBV model represents small and large flows more accurately, being closer to the average runoff. However, the HBV model tends to overestimate flows in some wet months, while Témez's model significantly overestimates runoff in dry months. The proposed methodology requires few economic, material, human and technological resources, so the application of a precipitation model in areas with scarce information is effective for the evaluation of water resources, in the absence of methods that consider fewer variables of analysis and that generalize the phenomenon of the hydrological cycle.

Keywords: Hydrology, surface modeling, Cuitzeo lake, runoff, HBV, Témez.

fundamentales para comprender a profundidad el funcionamiento de la cuenca hidrográfica y para realizar pronósticos confiables de los caudales y volúmenes de escurrimiento esperados. Dentro de la amplia variedad de modelos precipitación-escorrimento desarrollados, los modelos que destacan por su versatilidad y uso extendido en distintas regiones del mundo son

particularmente, el modelo HBV originado en Suecia (Bergström, 1995) y el modelo Témez creado en España (Témez, 1977), los cuales se consideran hoy en día como dos de los modelos más utilizados para fines prácticos de simulación hidrológica.

A pesar de que ambos modelos han demostrado su utilidad en distintas regiones, su aplicabilidad en cuencas con condiciones climáticas y fisiográficas particulares puede variar. Por ello, es necesario evaluar su desempeño comparativo específicamente en la cuenca de interés. En regiones como la cuenca del Lago de Cuitzeo, así como en diversas partes de México, la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, la presencia de diversos usos y tipos de suelos, y la poca disponibilidad de información climatológica e hidrométrica (Sánchez-Quispe *et al.*, 2021) son retos importantes para la modelación hidrológica.

Considerando estas condiciones, el presente trabajo plantea como objetivo evaluar y comparar los modelos HBV y Témez a escala mensual en 3 subcuencas pertenecientes a la cuenca del Lago de Cuitzeo. La comparativa permitirá identificar fortalezas y debilidades en la representación de los escurrimientos, así como generar recomendaciones para la elección

de un modelo óptimo para realizar simulaciones de escurrimientos a nivel subcuenca y cuenca en función del objetivo de análisis. Los resultados sentarán las bases para mejorar la evaluación de recursos hídricos en zonas con poca información y apoyar la gestión de las cuencas hidrológicas en la región.

Materiales y métodos

La metodología consistió principalmente en la caracterización de las subcuencas en estudio, las cuales forman parte del Sistema de Recursos Hídricos (SRH) de la cuenca del Lago de Cuitzeo a través de la obtención de información geoespacial, climatológica e hidrométrica de distintas bases de datos (Figura 1), con su respectivo procesamiento y análisis en software como ArcGIS, QGIS y Microsoft Excel. Posterior al tratamiento de datos, se continuó con la aplicación de los modelos Témez y HBV, para ello, se emplearon los programas EvalHid y CalEv.

Información geoespacial

Para delimitar la zona de estudio, se descargaron diversos archivos de tipo ráster y vectorial, principalmente de tres bases de datos:

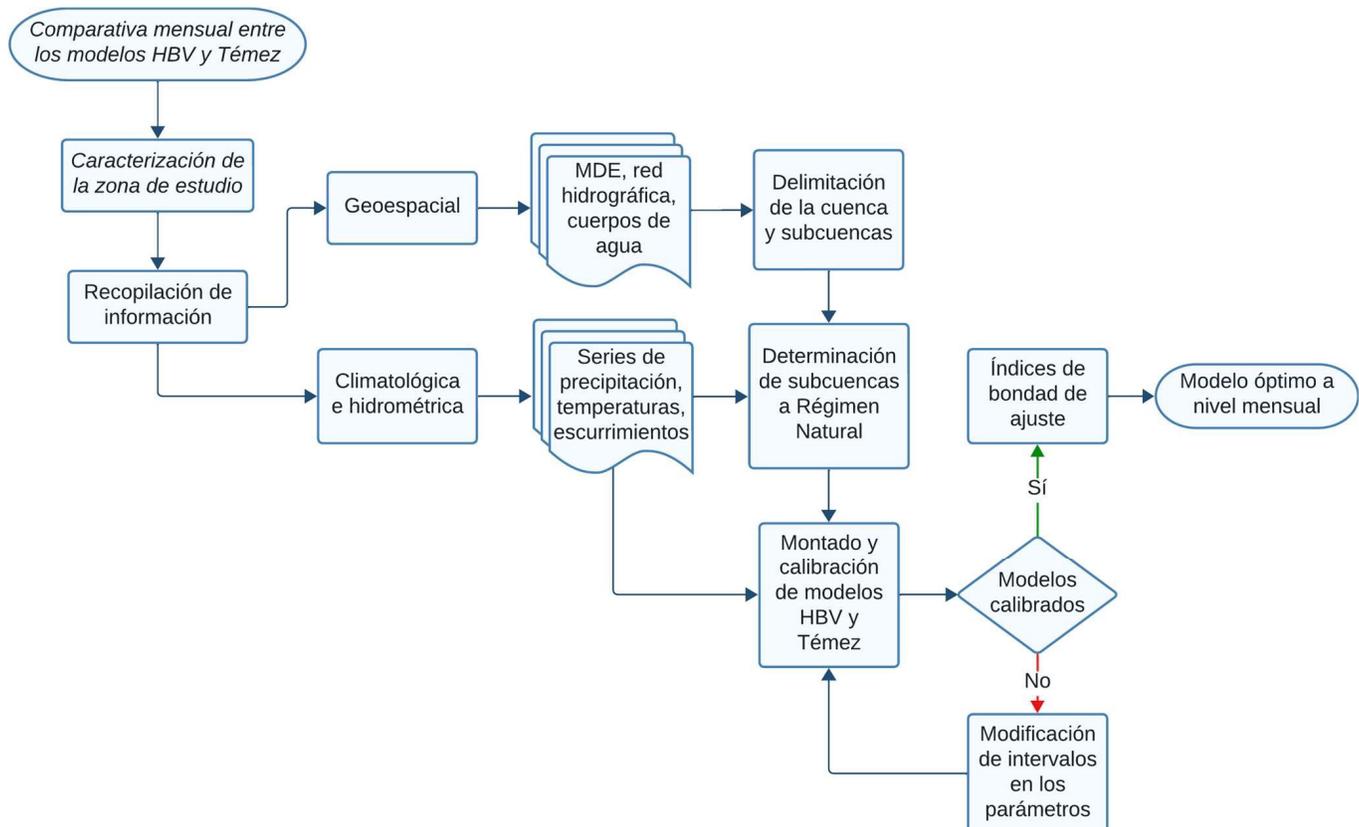


Figura 1. Metodología propuesta.

- a. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model V003 (NASA, 2018).
- b. Geografía y Medio Ambiente (INEGI, 2023).
- c. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB; CONABIO, 2023).

Procesamiento de información geoespacial

Los archivos se procesaron en Sistemas de Información Geográfica (SIG) los cuales se utilizaron para el procesamiento de datos vectoriales y ráster, permitiendo analizar capas como el modelo digital de elevación, redes hidrográficas, cuerpos de agua, etc. QGIS se empleó principalmente para la elaboración de mapas temáticos y representación gráfica de resultados.

Información climatológica

La obtención de información de las estaciones climatológicas se hizo a través de la base de datos de

Climate Computing Project (CLICOM) (CICESE, 2023) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se seleccionaron 64 estaciones climatológicas (**Figura 2**) dentro y fuera de la zona de estudio realizando un búfer de 20 km alrededor de la cuenca. El búfer se realizó con la finalidad de capturar las estaciones más cercanas a la cuenca de tal modo que tengan influencia en el sitio de interés. Los datos a recopilar de las estaciones climatológicas son de precipitación y temperatura.

Validación de estaciones climatológicas

Como parte del procesamiento de datos, se realizó la validación de la información de precipitación registrada en las estaciones meteorológicas. Esta debe ser representativa y precisa del lugar donde se mide, para ser utilizada de manera confiable en el análisis hidrológico y la gestión del recurso hídrico, las series utilizadas deben cumplir con dos propiedades: deben ser homogéneas e independientes (Li Juan y Zhong Wei, 2012).

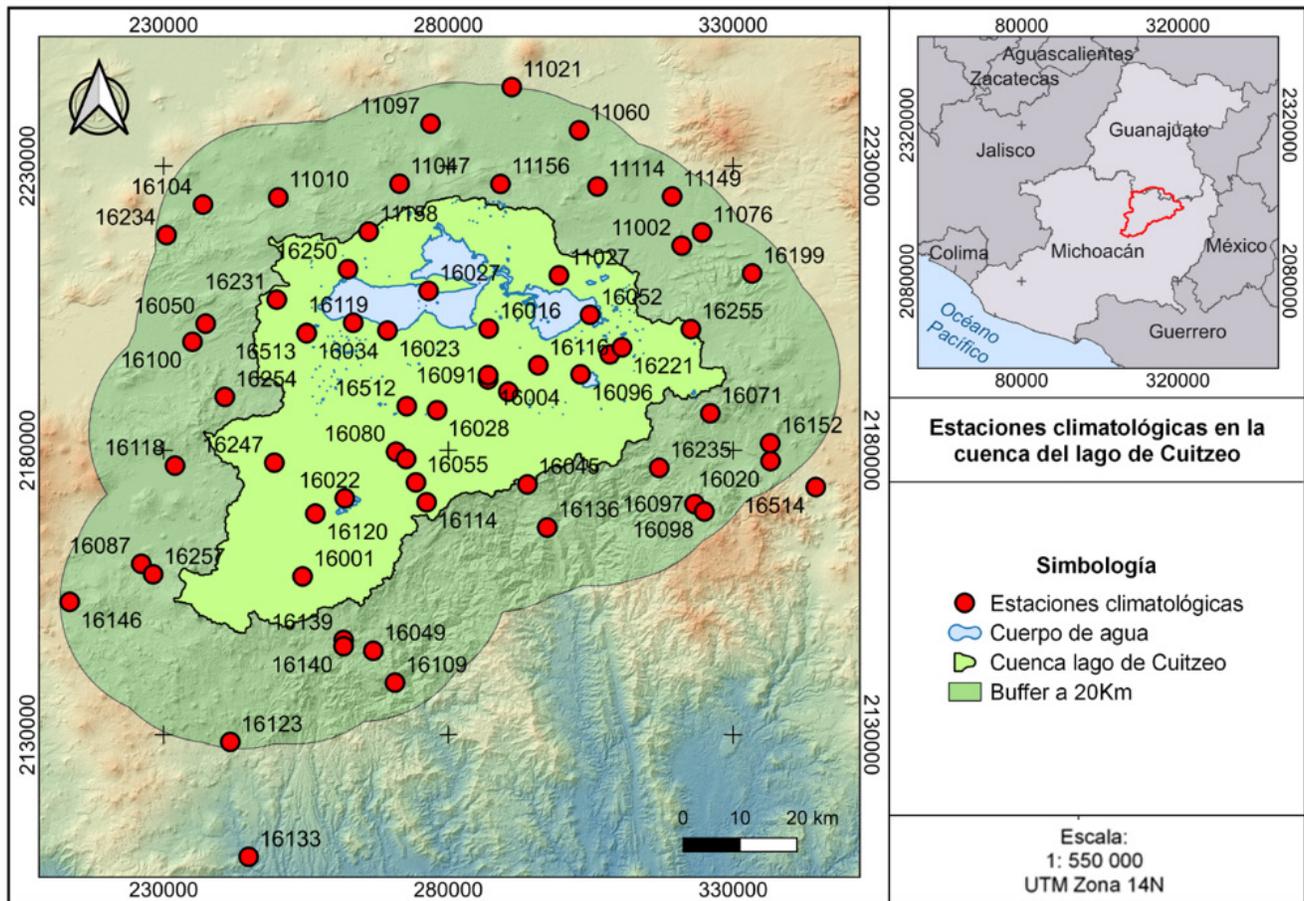


Figura 2. Estaciones climatológicas dentro y fuera de la zona de estudio.

Se validaron las 64 estaciones climatológicas a través de la metodología propuesta por Sánchez Quispe *et al.* (2021) para evaluar la calidad y cantidad de los datos, su homogeneidad e independencia a través de la aplicación de pruebas estadísticas para corroborar la consistencia de datos como lo son la prueba de Helmert, T-Student, Cramer, Wlad-Woldfowits y para determinar la independencia de los datos se aplicó la prueba de Límites de Anderson. Se pudo determinar que solo 16 estaciones climatológicas son adecuadas para utilizar sus datos por lo que se consideran estaciones principales para el estudio. Además, un criterio de selección fue que el registro histórico de las estaciones climatológicas coincidiera con las series históricas de las estaciones hidrométricas disponibles, el periodo abarca del año 1960 al 1990. De este modo, una vez que se ha garantizado la calidad de los datos y que dichas estaciones abarcan la zona de estudio, termina la etapa de la validación de la información.

Llenado de datos de las estaciones climatológicas principales

Se obtuvieron las series de precipitación (mm) y temperaturas mínimas, medias y máximas (°C) de las 16 estaciones climatológicas principales. Estas series presentan datos faltantes y se llenaron a través de los métodos matemáticos Inverso de la Distancia Euclidiana al Cuadrado (IDW) (Campos Aranda, 1998) el cual consiste en trasladar la información de una estación que cuenta con el dato faltante de otra ponderando el valor en función de la distancia en el caso de la precipitación y para las temperaturas se calculó la Media Aritmética dado que el valor de la temperatura no presenta variación drástica en el tiempo.

Obtención de la evapotranspiración potencial

La Evapotranspiración Potencial (ETP; mm), se calculó con las series de temperatura que se obtuvieron, para ello se utilizó el método de Hargreaves y Samani (1985), que es de escala diaria y cuenta con cuatro datos de entrada los cuales son: temperatura mínima, media, máxima y radiación solar extraterrestre definida como la cantidad de luz y calor que el sol envía a la tierra la cual es definida por tablas y se obtiene en función de la época del año y latitud de la estación climatológica. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$ET_o = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_a$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración potencial en mm/día

T_{media} = Temperatura media diaria en °C

T_{max} = Temperatura máxima diaria en °C

T_{min} = Temperatura mínima diaria en °C

R_a = Radiación extraterrestre en mm/día

Información hidrométrica. Análisis y validación

Para obtener la información de las estaciones hidrométricas, se utilizó la base de datos del Banco Nacional de Datos de Agua Superficiales (BANDAS; CONAGUA, 2016). Se encontraron dentro de la delimitación de la cuenca 15 estaciones hidrométricas (**Figura 3**). De las 15 estaciones hidrométricas encontradas, se les aplicaron pruebas de consistencia de datos y un análisis visual siguiendo nuevamente la metodología propuesta por Sánchez-Quispe *et al.* (2021). Se determinó que solo tres estaciones hidrométricas se consideran a “régimen natural”, además de estar ubicadas en las subcuencas de cabecera de la cuenca. Estas estaciones hidrométricas se utilizaron como puntos de salida para generar las subcuencas tratadas en este estudio, las cuales son: Santiago Undameo, Queréndaro y Tarímbaro, los datos históricos de escurrimiento de estas estaciones se usaron para calibrar los modelos HBV y Témez y para el cálculo de los índices de bondad de ajuste de los modelos a nivel mensual.

Modelo precipitación-escurrimiento HBV

Uno de los modelos utilizados en el estudio es el modelo conceptual HBV (Bergström, 1995) del Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco, el cual es un modelo precipitación-escurrimiento de tipo agregado que consta de tres tanques o celdas principales que representan los procesos de humedad del suelo, humedad subsuperficial y humedad subterránea. El modelo opera a escalas temporales diaria, mensual y anual, cuenta con ocho parámetros que se definen en la **Tabla 1**, que requieren calibración y tres condiciones iniciales relacionadas con el contenido de agua en cada celda.

En la **Figura 4** se ilustran esquemáticamente las tres celdas del modelo HBV y las interacciones entre ellas que permiten calcular la escorrentía total combinando el

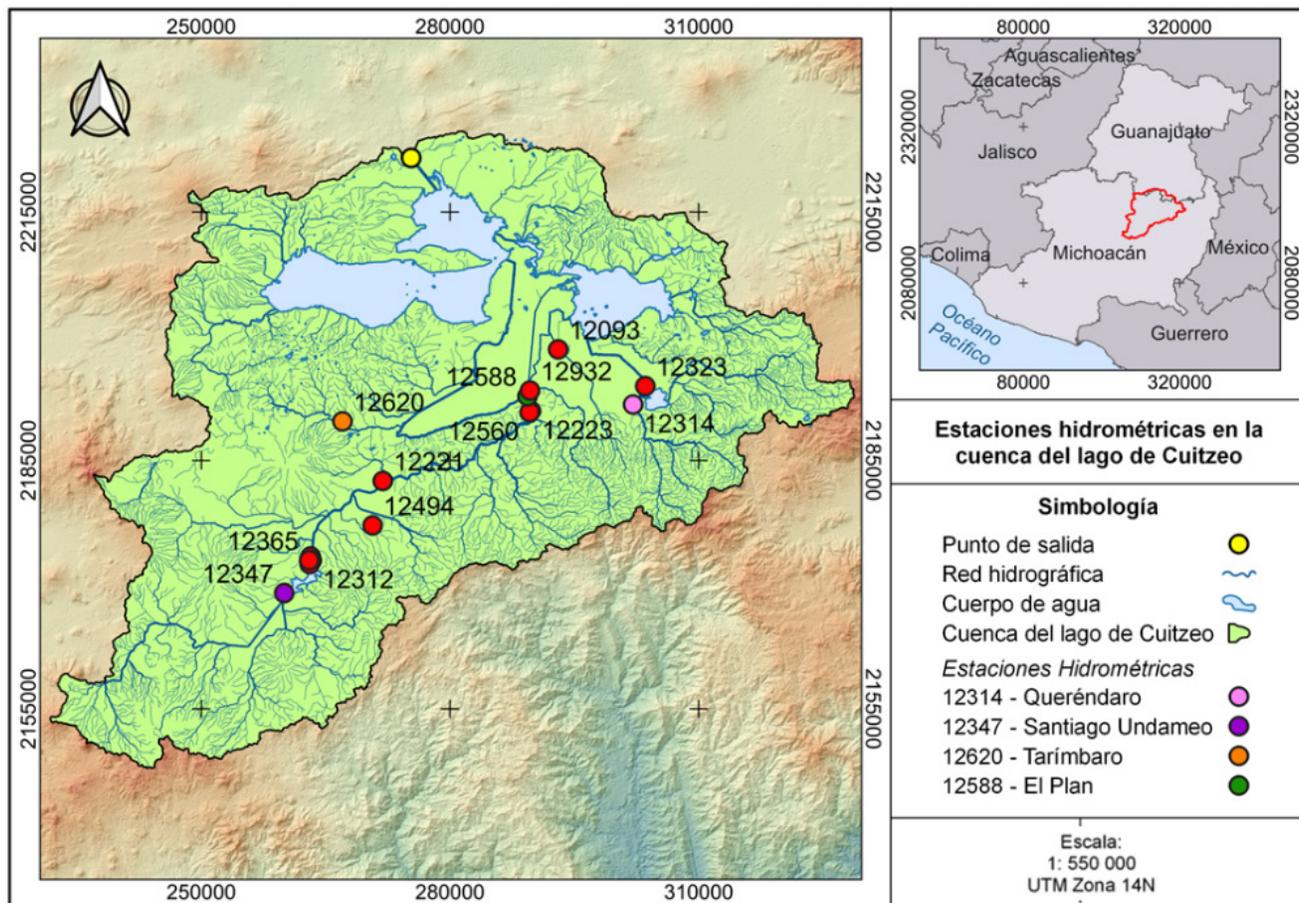


Figura 3. Estaciones hidrométricas en la zona de estudio.

flujo superficial directo, el flujo rápido, el flujo lento y el flujo subterráneo.

Modelo precipitación-escorrentía Témez

El segundo modelo utilizado fue el de Témez (1977), de precipitación-escorrentía de tipo agregado, pero con una estructura más simplificada. Consta únicamente

de dos tanques o celdas principales que representan la humedad del suelo y el volumen almacenado en el acuífero (Figura 5). Cuenta con cuatro parámetros a calibrar y dos condiciones iniciales relacionadas con el contenido de agua en cada celda. Opera a escala mensual y anual, por lo que requiere menos datos de entrada y su calibración es menos compleja en comparación con el

Tabla 1. Descripción y valores probables de los parámetros del modelo HBV (Adaptado de Beck et al., 2016).

Parámetro (unidades)	Descripción	Min.	Max.
FC (mm)	Capacidad máxima de almacenamiento de humedad en la zona saturada	30	650
β (-)	Coefficiente de forma de la función de recarga (infiltración)	1	6
PWP (mm)	Valor de la humedad del suelo por encima del cual la evaporación real alcanza la evaporación potencial	30	650
Lmax (mm)	Umbral de descarga extra de la zona superior	0	100
K0 (día ⁻¹)	Coefficiente de descarga rápida en el depósito superior	0.001	1
K1 (día ⁻¹)	Coefficiente de recesión del depósito superior	0.001	1
Kperc (mm día ⁻¹)	Coefficiente de máxima percolación a la zona inferior	0.001	1
K2 (día ⁻¹)	Coefficiente de recesión del depósito inferior	0.001	1

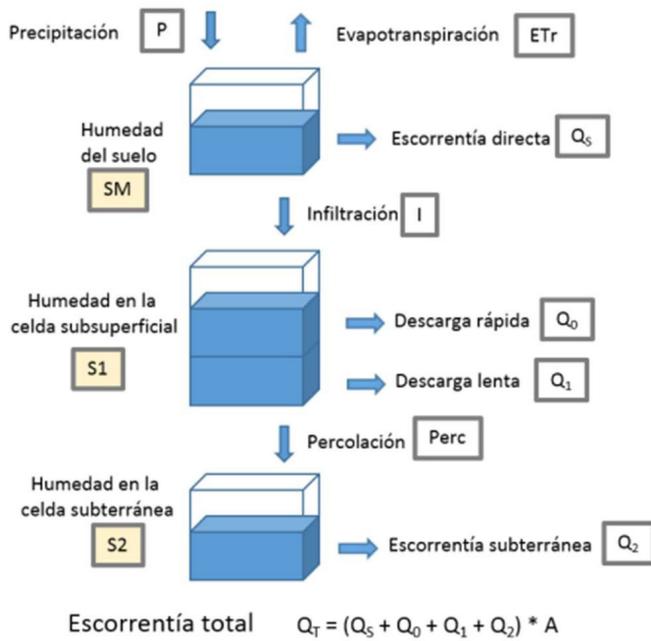


Figura 4. Esquema general del modelo HBV (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014).

modelo HBV. El modelo Témez podría tener ventajas en cuencas con escasez de datos.

Traslado de las series de datos

Tanto el modelo de Témez como el modelo HBV se aplicaron de forma semidistribuida en las tres subcuencas anteriormente mencionadas, es decir, las subcuencas se dividieron en microcuencas y se trasladaron por el método IDW las series de evapotranspiración y precipitación de las estaciones principales a los centroides de estas microcuencas (estaciones ficticias). La influencia de las estaciones principales sobre las microcuencas fue determinada mediante Polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911) ya que este método se aplica solo para conocer la influencia del área de la estación climatológica en el sitio de interés y resulta más sencillo de aplicar en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica.

EvalHid

Para calcular los escurrimientos de los modelos HBV y Témez se utilizó el software EvalHid (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014) de la Universidad Politécnica de Valencia, dicho software cuenta con una gran variedad de modelos de precipitación-escurrimiento (Témez, HBV, Sacramento, GR4J, GR2M y AWBM). El programa permite ingresar los datos de alimentación de los

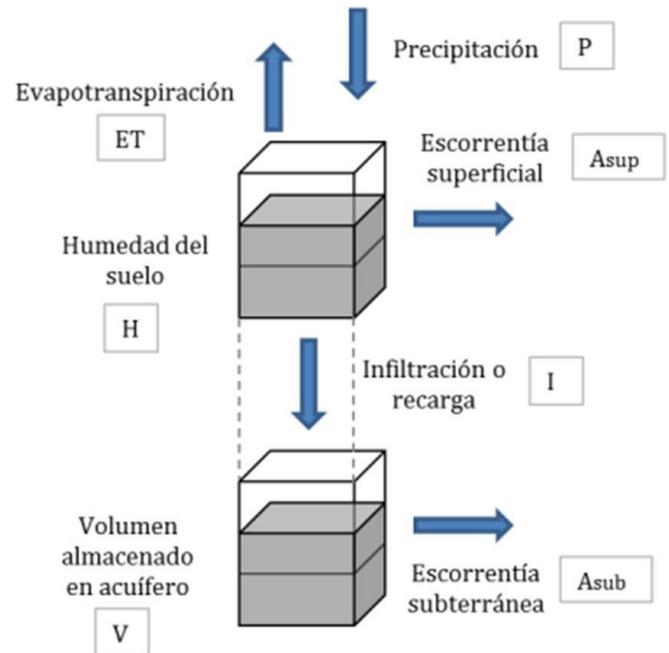


Figura 5. Esquema general del modelo de Témez (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014).

modelos (precipitación y evapotranspiración potencial) y los escurrimientos históricos de referencia a través de una hoja cálculo de Excel habilitada para macros, las series de precipitación y evapotranspiración potencial de las estaciones ficticias en las microcuencas fueron ingresadas de esta manera.

Calibrador para EvalHid

EvalHid solo permite realizar el cálculo y visualización de los escurrimientos de los modelos anteriormente mencionados, sin embargo, los parámetros de los modelos deben de ser ingresados de forma manual, por lo que fue necesario hacer uso del software Calibrador para EvalHid (CalEv) (García-Romero *et al.*, 2019) el cual usa para obtener los valores óptimos de dichos parámetros. Esta es una aplicación orientada a la optimización de los parámetros del modelo precipitación-escurrimiento a través de dos algoritmos de optimización: uno de búsqueda local con lanzamientos múltiples, y otro del tipo evolutivo. A través de una función objetivo (FO) compuesta por 4 índices estadísticos:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
- Logaritmo natural o neperiano del Coeficiente de

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (In NSE)
- Coeficiente de Correlación de Pearson (r)
- Coeficiente de Simetría de Medias (SM)

Estos algoritmos estiman el conjunto de parámetros óptimos que permiten que los caudales simulados sean estadísticamente similares a la serie de caudales aforados (García-Romero *et al.*, 2019).

Índices de bondad de ajuste

Los distintos parámetros obtenidos en CalEv de ambos modelos para las tres subcuencas estudiadas y las condiciones iniciales supuestas se ingresaron en EvalHid y se simularon los escurrimientos, a su vez se evaluaron contra 4 índices de bondad de ajuste a nivel mensual: Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), Logaritmo de Nash-Sutcliffe (In NSE), Correlación de Pearson (r) y Coeficiente de Simetría de Medias (SM). Los índices de bondad de ajuste son los encargados

de determinar numérica y estadísticamente que tan similares son los escurrimientos simulados contra los históricos. El mejor valor de ajuste de los cuatro índices es la unidad.

Resultados y discusión

A través del procesamiento en los sistemas de información geográfica del modelo digital de elevaciones, y con apoyo de la red hidrográfica y cuerpos de agua, se realizó la delimitación de la cuenca del lago de Cuitzeo (**Figura 6**). Con la delimitación propuesta, la cuenca tiene un área total de 3933.06 km² y un perímetro de 425.32 km.

La **Figura 7** muestra espacialmente las delimitaciones de las tres subcuencas estudiadas con los modelos HBV y Témez en la cuenca del lago de Cuitzeo. Los puntos de salida son las estaciones hidrométricas 12347-Santiago Undameo, 12314-Queréndaro y 12620-Tarímbaro, las cuales se encuentran en la cabecera de la cuenca y están a régimen natural.

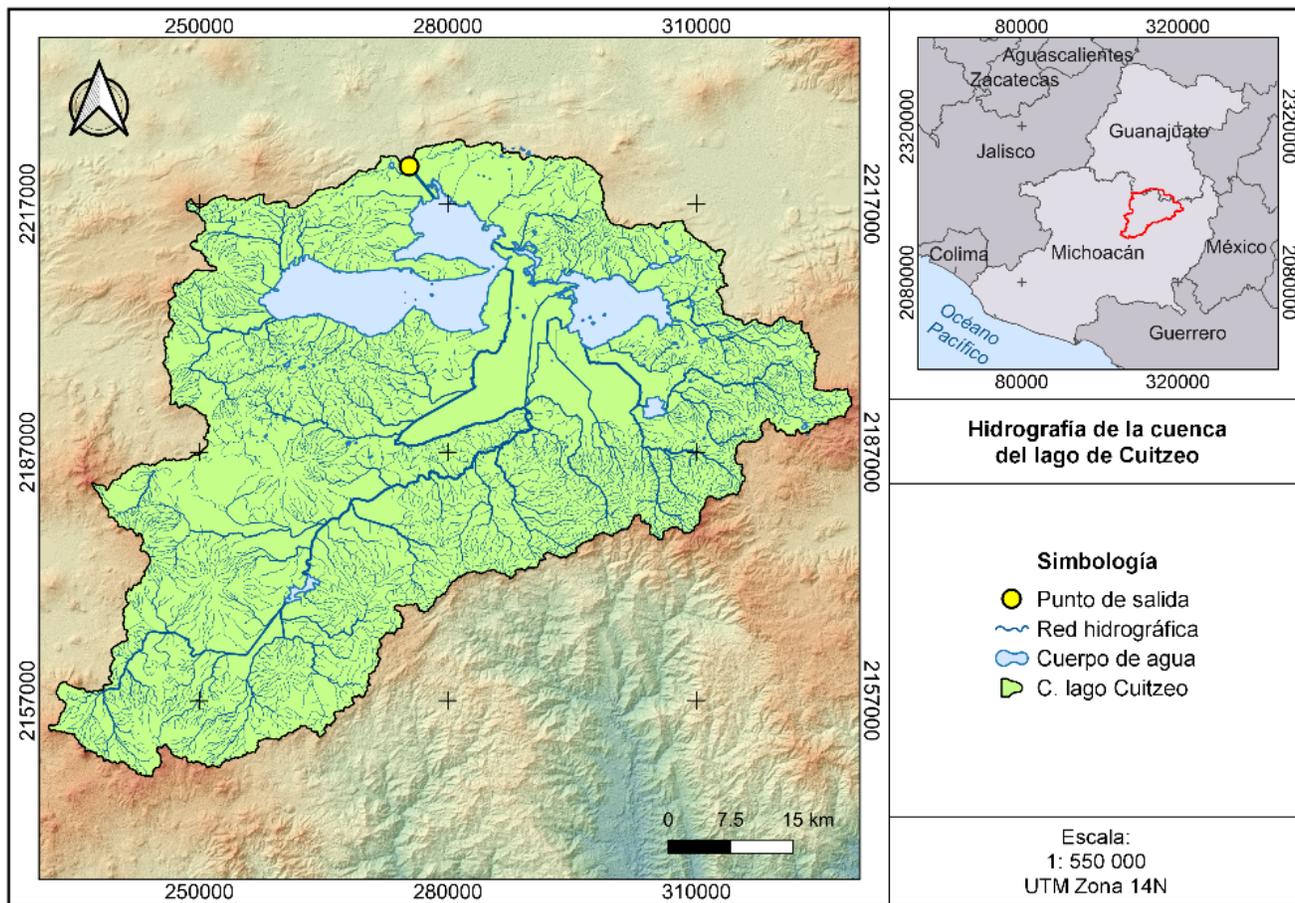


Figura 6. Delimitación de la cuenca del lago de Cuitzeo.

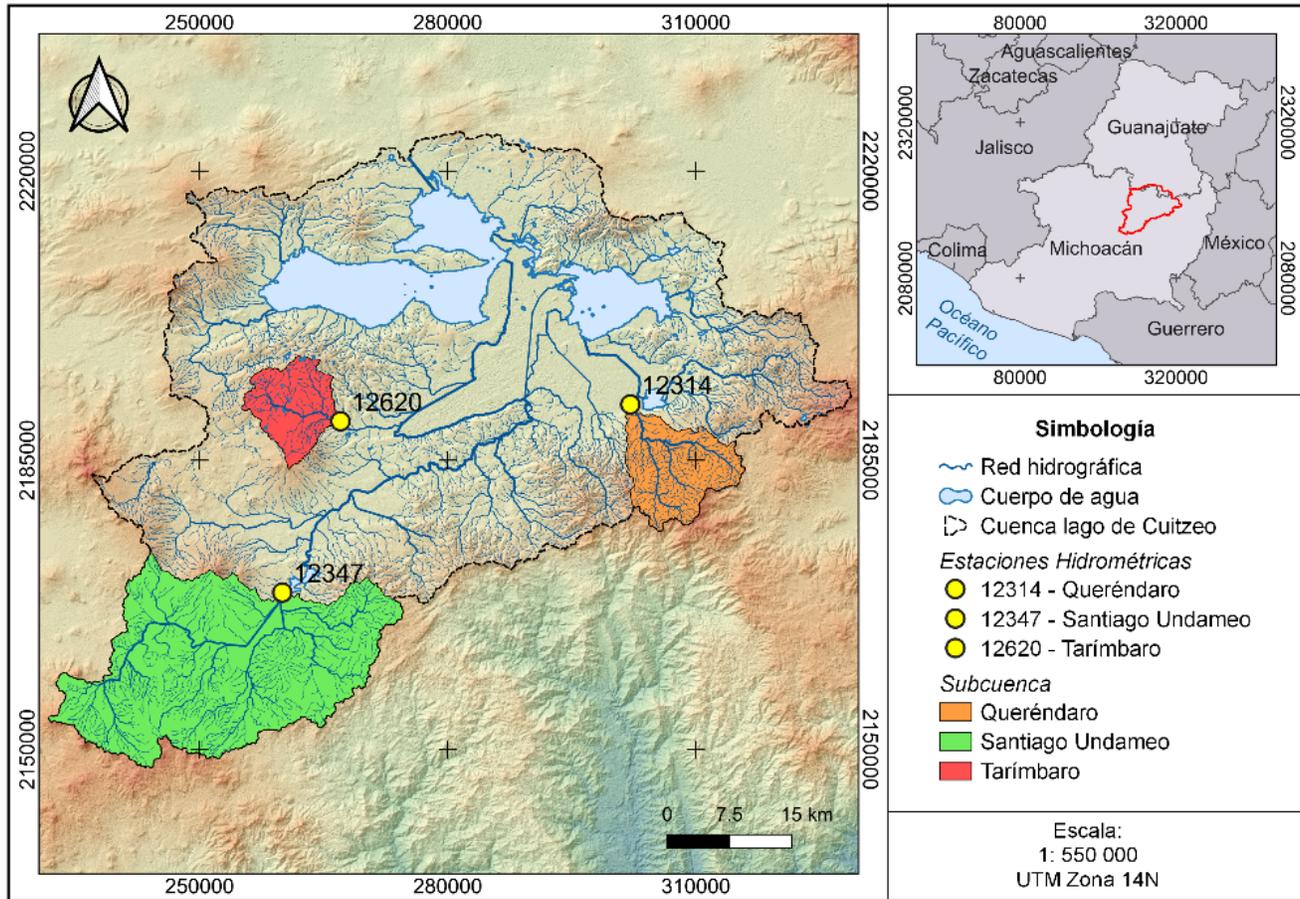


Figura 7. Subcuencas a régimen natural en la cuenca del lago de Cuitzeo.

La **Figura 8** representa de forma gráfica el traslado de las series de precipitación y evapotranspiración potencial a los centroides de las microcuencas de Santiago Undameo por los métodos IDW y Polígonos de Thiessen, este proceso fue realizado de forma similar para las dos subcuencas restantes.

En la **Tabla 2** se muestran los ocho parámetros óptimos del modelo HBV obtenidos con el software CalEv en las tres subcuencas, se puede observar que varían significativamente entre sí, ya que

las condiciones hidrológicas son distintas, debido a las diferentes características como el área, la precipitación media anual, los usos y los tipos de suelo, así como la

cobertura vegetal.

La **Tabla 3** establece las condiciones iniciales supuestas de las tres celdas del modelo HBV que obtuvieron los mejores índices de bondad de ajuste en la calibración.

En la **Tabla 4** se indican los valores óptimos de los cuatro parámetros y las condiciones iniciales de las dos celdas del modelo de Témez en las tres subcuencas, como es de esperarse y tal como en el modelo HBV, los parámetros son muy distintos entre sí por las razones ya comentadas.

Cabe destacar que algunos parámetros como el Factor de Campo (FC) del modelo HBV y la Capacidad Máxima

Tabla 2. Parámetros óptimos del modelo HBV en las subcuencas a régimen natural.

Subcuenca	Beta	FC (mm)	PWP (mm)	Lmax (mm)	K0	K1	K2	Kperc
Santiago Undameo	1.372	797.251	156.712	0.400	0.067	0.067	0.005	0.067
Queréndaro	0.755	998.967	198.197	85.029	0.229	0.124	0.056	0.479
Tarimbaro	3.408	355.571	276.859	13.192	0.636	0.299	0.001	0.065

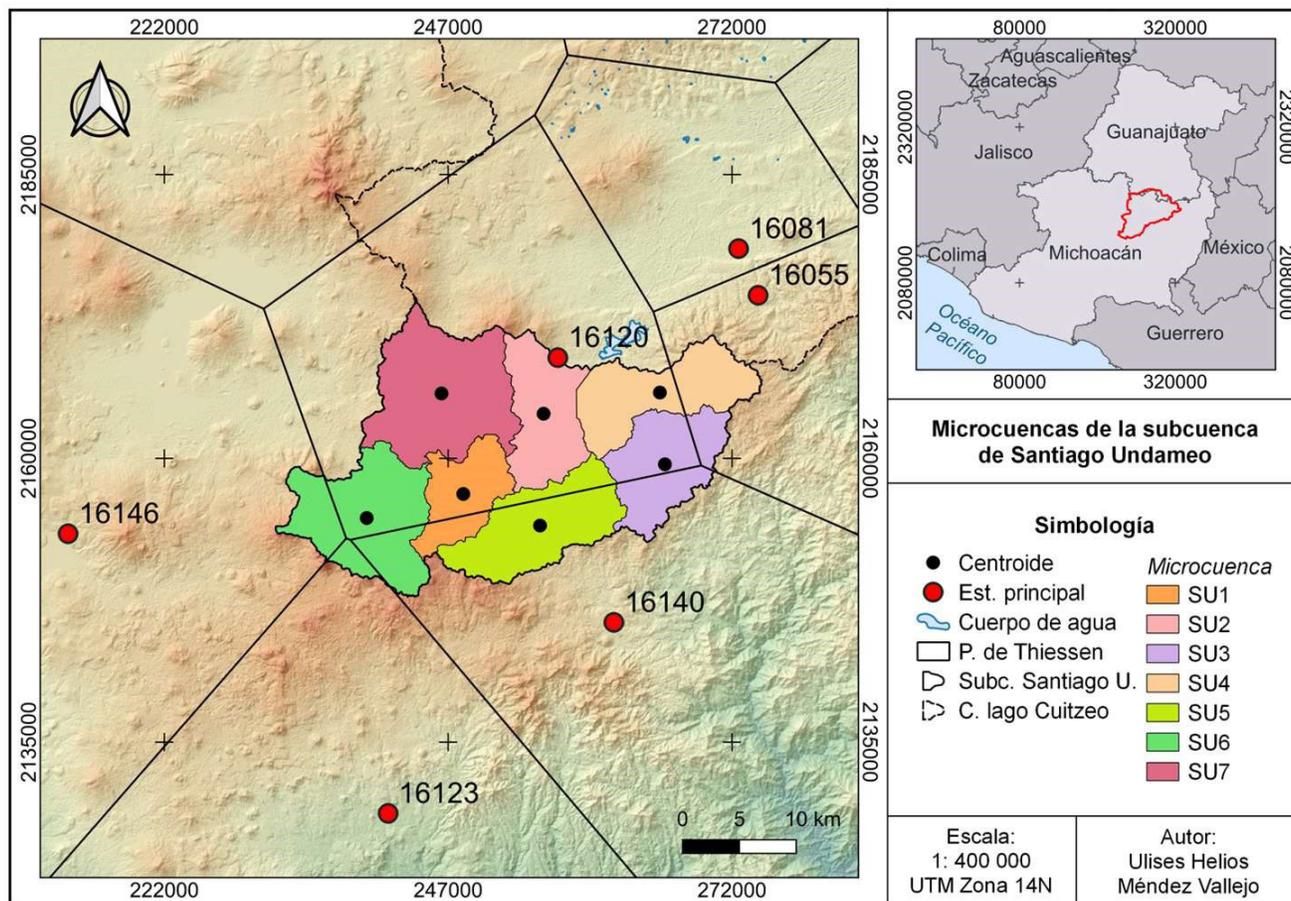


Figura 8. Polígonos de Thiessen en la subcuenca de Santiago Undameo.

de Almacenamiento del Suelo (Hmax) del modelo de Témez rebasaron los límites probables de la literatura, sin embargo, en un modelo calibrado, los parámetros pueden rebasar los límites (Paredes-Arquiola *et al.*, 2014). Es importante no rebasar en gran medida estos parámetros ya que esto indica un sobreajuste que no representa las condiciones físicas e hidrológicas de la cuenca modelada. Tras calibrar y validar ambos modelos en las subcuencas, se simuló los escurrimientos, sin embargo, no es posible compararlos ya que están a diferente escala temporal. Para lograr la comparación se acumularon los escurrimientos diarios del modelo HBV

para conseguir la escala mensual y se compararon con los escurrimientos mensuales del modelo de Témez y a su vez con los escurrimientos mensuales históricos, es decir, se comparan los escurrimientos mensuales de ambos modelos contra los escurrimientos observados para determinar la calidad de la modelación. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 9.

Los índices de bondad de ajuste mostrados en la Tabla 5 indican que el modelo HBV representó mejor los escurrimientos en las tres subcuencas, siendo la de Santiago Undameo donde tuvo un mejor ajuste, seguido de Queréndaro y Tarímbaro. Esto se observa gráficamente en la Figura 9, donde el modelo HBV se ajusta mejor a los caudales grandes y pequeños en comparación con el modelo de Témez. Lo anterior se refuerza con los índices NSE y ln NSE, que tienen sensibilidad a caudales altos y bajos respectivamente. Aunque en algunos meses húmedos el modelo HBV tiende a sobreestimar los escurrimientos, mientras que

Tabla 3. Condiciones iniciales en las celdas del modelo HBV en las subcuencas a régimen natural.

Subcuenca	H0 (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)
Santiago Undameo	40	1.50	75
Queréndaro	0	0	0
Tarímbaro	50	1	100

Tabla 4. Parámetros óptimos y condiciones iniciales del modelo Témez en las subcuencas a régimen natural.

Subcuenca	Parámetros				Condiciones iniciales	
	Hmax (mm)	C	Imax (mm)	Alfa	H0 (mm)	V0 (mm)
Santiago Undameo	499.993	0.121	110.318	0.331	40	80
Queréndaro	289.431	0.06	998.688	0.99	0	0
Tarímbaro	366.885	0.1	53.907	0.436	0	0

Tabla 5. Índices de bondad de ajuste de los modelos HBV y Témez en las subcuencas a régimen natural.

Índice de bondad de ajuste	HBV			Témez		
	Santiago U.	Queréndaro	Tarímbaro	Santiago U.	Queréndaro	Tarímbaro
NSE	0.85	0.58	0.58	0.74	0.48	0.45
ln NSE	0.83	0.62	0.47	0.72	0.65	0.37
r	0.93	0.77	0.76	0.86	0.72	0.67
SM	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Promedio	0.90	0.74	0.70	0.83	0.71	0.62

el modelo de Témez los sobreestima notoriamente en meses secos. No obstante, el modelo de Témez es mucho más sencillo de implementar al ser de escala mensual, requiere considerablemente menos datos y la mitad de los parámetros, ofreciendo resultados muy cercanos al modelo HBV.

De acuerdo con los criterios de calidad de ajuste de Moriasi *et al.* (2007) de la **Tabla 6** basados en el índice NSE, el modelo HBV para la subcuenca de Santiago Undameo se considera «Muy Bueno», mientras que en las subcuencas de Queréndaro y Tarímbaro ambos modelos son «Satisfactorios». En cuanto al modelo de Témez, en Santiago Undameo es «Bueno», pero en Queréndaro y Tarímbaro es «No Satisfactorio». Sin embargo, para este caso se utilizó el promedio de los índices de calidad de ajuste dado que el uso de un promedio de varios métodos puede proporcionar una estimación general. No obstante, si se requiere mayor certeza de la calidad de los datos se puede proponer un promedio ponderado dándole mayor peso a aquel índice de calidad de ajuste que sea más representativo. Se determina que la evaluación de

ambos modelos mejora considerablemente en todas las subcuencas.

Conclusiones

Con base en los índices de bondad de ajuste calculados a partir de todas las simulaciones realizadas a escala mensual, se observó que el modelo HBV representa los caudales pequeños y grandes de manera más precisa, acercándose mejor a la media de escurrimientos. No obstante, el modelo HBV tiende a sobrestimar los caudales en algunos meses húmedos, mientras que el modelo de Témez sobreestima notablemente los escurrimientos en los meses secos.

En general, ambos modelos sobreestiman los escurrimientos, aunque el modelo HBV lo hace en menor medida que el modelo de Témez. Esta diferencia se debe a la falta de información de precipitación, lo cual obliga a generar información sintética para lograr series continuas. A pesar de ello, los resultados obtenidos son útiles cuando se dispone de poca información. La metodología propuesta es una solución que requiere pocos recursos económicos, materiales, humanos y tecnológicos, por lo que la aplicación de un modelo de precipitación en zonas con escasa información resulta eficaz para la evaluación de los recursos hídricos, a falta de métodos que consideren menos variables de análisis y que generalicen el fenómeno del ciclo hidrológico.

Los puntos mencionados anteriormente indican que el modelo HBV es más eficaz que el modelo Témez a

Tabla 6. Calidad de ajuste para el índice Nash-Sutcliffe (NSE) (Adaptado de Moriasi *et al.*, 2007).

Calidad de Ajuste	NSE
Muy Buena	$0.75 < NSE \leq 1$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$
No Satisfactoria	$NSE \leq 0.50$

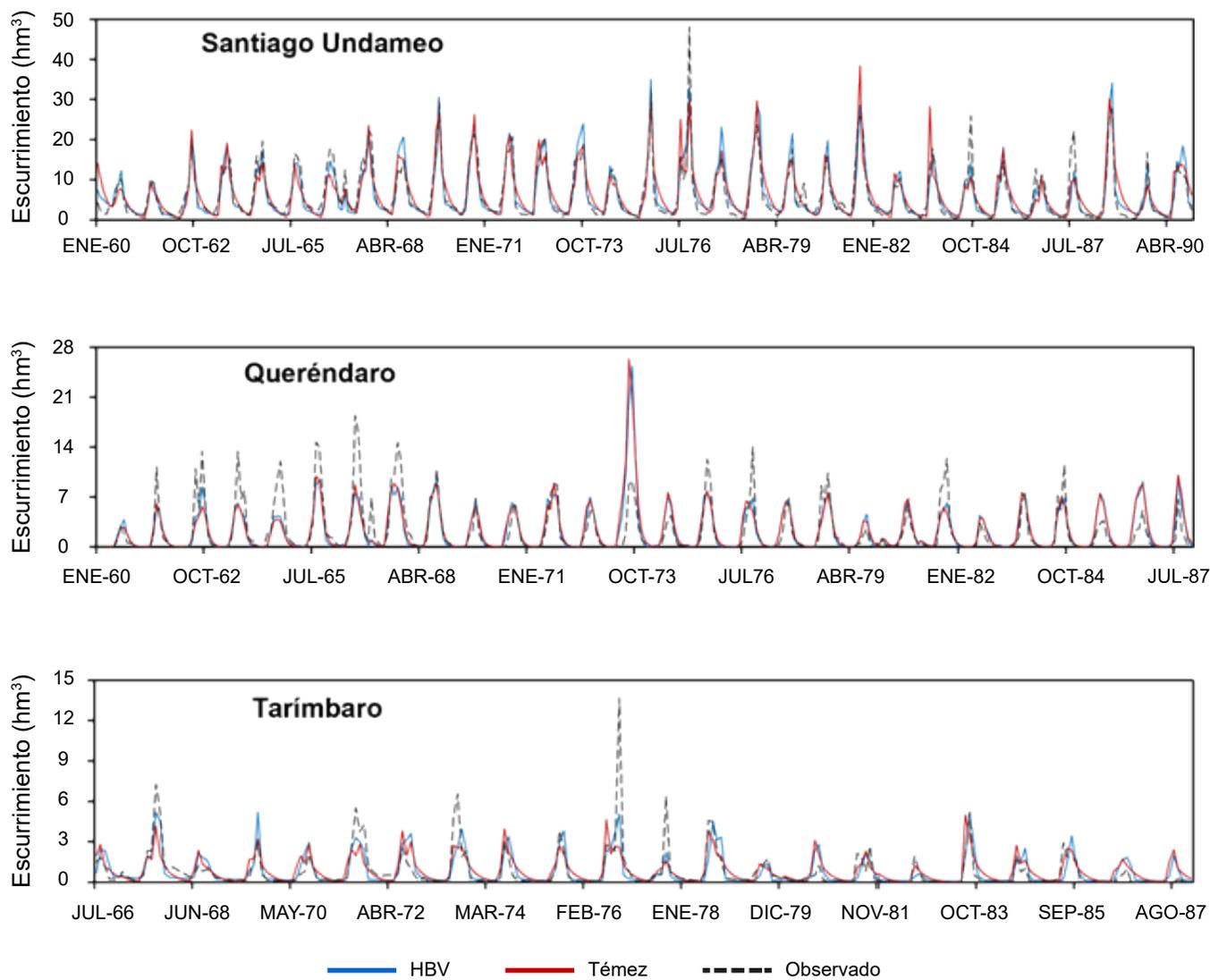


Figura 9. Ecurrimientos mensuales en las subcuencas a régimen natural.

escala mensual. Esto se explica porque el modelo HBV se calcula a escala diaria y fue acumulado mensualmente para poder compararlo con el modelo Témez, que se calcula de forma mensual. Esta diferencia en las escalas influye en que los escurrimientos mensuales grandes y pequeños sean mejor representados, al igual que la cantidad media de agua escurrida. Sin embargo, es importante recalcar que estos resultados se obtuvieron en la cuenca del lago de Cuitzeo en las subcuencas estudiadas y con el criterio del modelador, por lo que esta regla puede no cumplirse siempre en otras cuencas debido a las condiciones hidrológicas y a las experiencias de los modeladores. No obstante, esta metodología es una propuesta que genera recomendaciones para el

objetivo de análisis y de trabajo de otros modeladores.

En cuanto a los procesos realizados para la creación de los modelos precipitación-escurrimiento, se pudo determinar que el modelo Témez es más fácil y rápido de realizar, así como de calibrar, ya que cuenta con solo cuatro parámetros y dos condiciones iniciales. La cantidad de datos necesarios para alimentar el modelo Témez es mucho menor, aproximadamente 30 veces menos cantidad de datos en un modelo a escala mensual en comparación con un modelo a escala diaria. En cuanto a la recopilación de información, no hubo diferencias, ya que la información de las estaciones climatológicas es de escala diaria. Con respecto a la validación de datos a través de pruebas estadísticas, no hubo diferencias, ya

que estas se realizan a nivel anual. Para el llenado de datos faltantes, resulta mucho más fácil hacerlo a escala mensual, ya que a escala diaria estos faltantes son mucho más numerosos y, por lo tanto, se complica su llenado.

En conclusión, la escala temporal influye en la determinación de los escurrimientos simulados; un modelo a escala diaria proporciona mejores resultados a nivel mensual y, por lo tanto, a nivel anual, en comparación con un modelo a escala mensual. Se recomienda utilizar el modelo HBV en caso de que el estudio requiera una mayor precisión en la simulación de escurrimientos, es decir, cuantificar de manera precisa los escurrimientos pequeños, grandes y el promedio con el fin de lograr una gestión óptima de los recursos hídricos, recordando que este tipo de modelos no se utilizan para estimar eventos extremos o de riesgo. Sin embargo, la diferencia no es tan significativa en comparación con el modelo Témez, que también ofrece buenos resultados. Por lo tanto, si el estudio no requiere de precisión, por ejemplo, para una cuantificación de recursos hídricos, es conveniente usar el modelo Témez, ya que no vale la pena el tiempo, la dificultad y la cantidad de información que requiere un modelo a escala diaria solo por esa precisión adicional que ofrece.

Referencias

Bergström S (1995). The HBV Model, in: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, 443–476 pp.

Campos-Aranda DF (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*, México: Editorial Universitaria Potosina.

CICESE “Base de Datos Climatológica Nacional” (2023). Sistema CLICOM, <http://clicomex.cicese.mx/> [consultado el 12 de marzo de 2023].

CONABIO “Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad” (2023). Portal de Geoinformación 2023, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [consultado el 12 marzo de 2023].

CONAGUA “Bases de Datos Hidrométricas” (2023). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>, [consultado el 12 de marzo de

2023].

García-Romero L, Paredes-Arquiola J, Solera-Solera A, Palop-Donat C (2019). “Herramienta para la calibración de modelos precipitación-escorrentía en cuencas altamente reguladas”, VI Jornadas de Ingeniería del Agua: JIA 2019, <https://www.hidralab.com:4430/jia2019/wpcontent/uploads/2019/10/R116.pdf> [consultado el 12 de marzo de 2023].

Hargreaves GH, Samani ZA (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2):96-99. doi:10.13031/2013.26773.

INEGI “Geografía y Medio Ambiente” (2023). Temas, <https://www.inegi.org.mx/temas/> [consultado el 12 de marzo de 2023].

Li CJ, Zhong WY (2012). Progress in research on homogenization of climate data. *Advances in Climate Change Research* 3(2):59–67. doi:10.3724/SP.J.1248.2012.00059.

Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Binger RL, Harmel RD, Veith TL (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900. doi:10.13031/2013.23153.

NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team (2018) ASTER Global Digital Elevation Model V003: distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:10.5067/ASTER/ASTGTM.003.

Paredes-Arquiola J, Solera-Solera A, Andreu-Álvarez J, Lerma-Elvira N (2014). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf [consultado el 12 de marzo de 2023].

Sánchez-Quispe ST, Navarro-Farfán M del M, García-Romero L (2021). Methodology for processing meteorological and hydrometric data at basin level: Handbook T-XVI CIERMMI Women in Science Engineering and Technology. pp 107-157. doi:10.35429/H.2021.16.107.145.

Témez JR (1977). Modelo matemático de transformación precipitación-aportación. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. 39 pp.

Thiessen AH (1911). Climatological data for July 1911. District no. 10, Great Basin. *Monthly Weather Review* 39:1082-1084.



Propiedades químicas e índice de amortiguamiento a la contaminación de suelos urbanos

Chemical properties and cushioning index to urban soil pollution

Mariela Casillas Corona^{1*} , María Alcalá De Jesús¹, Francisco Bautista Zúñiga², Bertha Aguilar-Reyes³, Avto Goguitchaichvili³, Ma. del Carmen Delgado², Thomas Ihl[†]

¹ Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

² Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, Campus Morelia

³ Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Morelia

Historial

Manuscrito recibido: 7 de febrero de 2024

Manuscrito aceptado: 25 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Mariela Casillas Corona

e-mail: mariela.casillas@umich.mx

ORCID: 0009-0000-2841-852X

Resumen

La retención de metales pesados en el suelo tiene una relación directa con sus propiedades como el contenido de materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico. Con estas propiedades se desarrolló un índice de amortiguamiento (IA) a la contaminación y un mapa de distribución para Morelia, Michoacán. Las propiedades del suelo presentaron valores bajos que influyeron en la obtención de una clase de IA baja (0.31 a 0.42) en 75.50% de la superficie de la ciudad. Esto significa que la capacidad amortiguadora del suelo ante los metales pesados al ser baja, incrementa el daño a la población humana expuesta a las partículas de suelo y polvo contaminado.

Palabras clave: capacidad-amortiguadora, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, suelo urbano.

Introducción

La contaminación ambiental representa un problema en el aire, agua y suelo, en gran parte se debe al crecimiento de la mancha urbana y como resultado de esto, incrementan los desechos por la gasolina, humo de los vehículos y pinturas que emiten humo saturado de metales pesados que contaminan el ambiente y afecta tanto a suelos como a polvos urbanos, lo cual es grave para la salud humana y para los ecosistemas (Puga *et al.*, 2006; Machado *et al.*, 2008; Alcalá *et al.*, 2009 y Covarrubias y Peña, 2017). En la ciudad de México, se han reportado concentraciones altas de los siguientes metales: Zn (114.50 a 741.70 mg kg⁻¹), Pb (8.10 a 1188. mg kg⁻¹), Cu (28.90 a 98.20 mg kg⁻¹), y Cd (1.00 a 1.60 mg kg⁻¹)

Abstract

The retention of heavy metals in the soil is directly related to their properties such as organic matter content, pH and cation exchange capacity. With these properties, a damping index (AI) to pollution was developed, and a distribution map for Morelia, Michoacán. Soil properties had low values that influenced the obtaining of a low AI class (0.31 to 0.42) in 75.50% of the city surface. This means that the soil's buffering capacity against heavy metals is low, increasing the damage to the human population exposed to contaminated soil particles and dust.

Keywords: buffering capacity, cation exchange capacity, organic matter, urban soil.

(Morton-Bermea, 2006). Delgado *et al.* (2019) mencionan que la mayoría de los polvos en la ciudad de México depende de fuentes antropogénicas y presentan concentraciones de Cu, Ni, Pb, V y Zn. Además, Delgado *et al.* (2015) reportan concentraciones de Pb de 450 mg kg⁻¹, V 96 mg kg⁻¹ y Zn 373 mg kg⁻¹ que atribuyen a la afluencia vehicular de la ciudad de Morelia.

El mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), y cromo (Cr) son metales que se reportan para México debido a su abundancia y toxicidad de importante riesgo para la salud y para el medio ambiente (Fernández-Bremauntz *et al.*, 2004; Volke-Sepulveda *et al.*, 2005; Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010). El riesgo depende de la solubilidad y biodisponibilidad de los metales pesados

en el suelo; este es influenciado por factores como el pH, materia orgánica, y capacidad de intercambio catiónico, entre otras (Lee *et al.*, 2001; Galán y Romero 2008; Jordanova *et al.*, 2013). Los metales pesados en ambientes urbanos pueden ser ingeridos y llegar a constituirse en un problema de salud, ya que muchos de ellos ocasionan enfermedades graves, como el Pb en los niños (Bautista *et al.*, 2017; Flores-Ramírez *et al.*, 2012). Los estudios de la contaminación del suelo en zonas urbanas son principalmente sobre el diagnóstico por metales pesados; sin embargo, se ha realizado escasa investigación atendiendo a la prevención de la contaminación.

Las propiedades de los suelos como materia orgánica (MO), pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC) juegan un papel importante en la retención de los metales, ya que presenta la posibilidad de retenerlos de forma intercambiable y aportar a la solución del suelo productos que favorecen la formación de quelatos y la disponibilidad de los metales (McCauley *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2011). Existen reportes que indican una relación directa entre la retención de Pb y Zn con la MO, y con la CIC (Castro *et al.*, 2007; Méndez-Romero *et al.*, 2003), sin embargo, en éstos trabajos no se muestra información cuantitativa que exprese la concentración en que se presentan las propiedades de los suelos, no obstante que de éstas depende la disponibilidad y el intercambio de los iones, así como la retención de los metales pesados por la MO y las arcillas al jugar un papel en la capacidad amortiguadora de los suelos (Galán y Romero, 2008).

Con el fin de contar con un diagnóstico sobre la contaminación del medio, es necesario elaborar índices que incluyan a las propiedades de los suelos que amortiguan la contaminación por metales pesados; la amortiguación es la capacidad que tienen los suelos para controlar los efectos negativos de los contaminantes y volverlos inocuos o inactivos (Galán y Romero 2008). El objetivo de este trabajo fue desarrollar un índice de amortiguamiento (IA) a la contaminación del suelo por metales pesados a partir de sus propiedades químicas y hacer un análisis de la distribución espacial de estas en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La ciudad de Morelia se localiza en la región centro-norte del estado de Michoacán, a una altitud de 1920 m. El clima es templado subhúmedo con temperatura media

anual de 17.6 °C y precipitación de 773.5 mm anuales. Se define fisiográficamente por el corredor Tarasco y sierra de mil Cumbres pertenecientes al Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), está rodeada por el vulcanismo cuartanario (Quinceo-Las Tetillas y El águila) y volcanes del mioceno (Atécuaro y Punhuato); La geología pertenece a un complejo andesítico e ignimbritas “Cantera de Morelia” (Garduño, 2004). Los principales suelos son Acrisoles, presentan migración de arcilla y un horizonte árgico; Luvisoles, suelos con mayor contenido de arcillas en el suelo subsuperficial y una saturación de bases mayor a 50%; Andosoles, derivados de cenizas volcánicas ricas en vidrio y Vertisoles, suelos fértiles con alto contenido de arcillas expandibles (DETENAL, 1979; WRB 2015).

Las muestras de suelo urbano se obtuvieron de una investigación previa realizada por Bautista *et al.* (2007), las cuales se georeferenciaron. La localización de la zona de estudio se presenta en la **Figura 1**.

Se colectaron 98 muestras en áreas con diferente uso de suelo, de las cuales, 82 corresponden al suelo urbano localizadas en los usos de suelo conocidas como equipamiento, habitacional, industrial, mixto; cinco en la zona de reserva ecológica y 11 pertenecen a polvo urbano.

Las muestras de suelo fueron colectadas con cilindros de PVC de 5.0 cm de alto por 5 cm de diámetro, y los polvos, se tomaron del piso urbano en cuadrantes de 25 cm². Las muestras de suelo se secaron a la sombra, se trituraron y se pasaron por un tamiz de 2 mm de diámetro, para determinar la materia orgánica (MO) por combustión húmeda (Walkley y Black), el pH en H₂O relación suelo agua 1:2 y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) con acetato de amonio; la metodología para obtener estos parámetros químicos y su clasificación se llevó a cabo con base en la Norma Oficial Mexicana de suelos (NOM-023-SEMARNAT-2001). Aunque a los polvos urbanos no se les considera suelos (Carrasquero-Durán, 2006), en el presente estudio se les dio el mismo tratamiento que a los suelos. Los resultados de MO, pH y CIC de cada uno de los usos de suelo se procesaron en el programa Statgraphics plus 5.1 para obtener el ANOVA simple, mediante el cual se relacionó el uso de suelo con cada propiedad química. Se estimó el índice de amortiguamiento (IA) de los suelos estudiados a partir de las propiedades químicas analizadas a las que se les asignó un valor de ponderación con base en 1.0 (Ecuación 1), el más alto para la CIC que es la propiedad que tiene mayor relación con la capacidad amortiguadora de los suelos (Aguilar *et al.*, 2011; Ortiz-Villanueva y

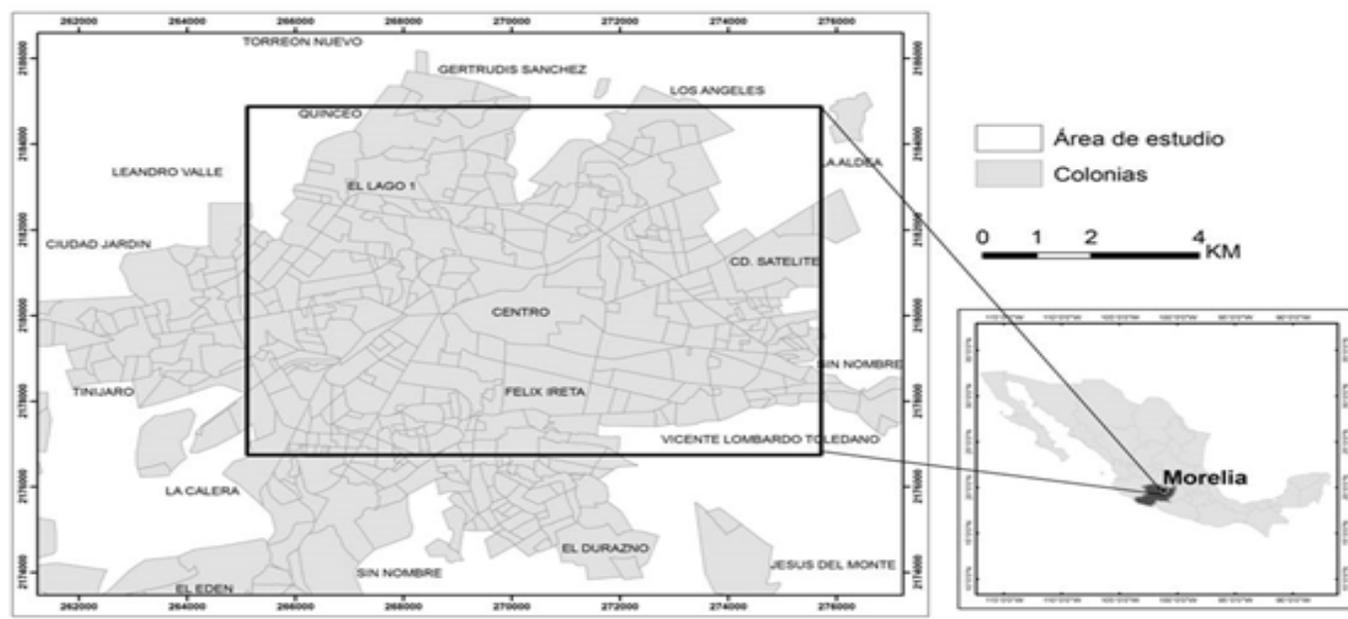


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Ortiz, 1990). Se realizaron mapas de distribución de las propiedades químicas y del IA editados en el programa geoestadístico ArcGIS 9.

Ecuación 1:

$$IA = (V_{\text{muestra}} \text{CIC} / V_{\text{max}} \text{CIC}) (0.4) + (V_{\text{muestra}} \text{MO} / V_{\text{max}} \text{MO}) (0.3) + (V_{\text{muestra}} \text{pH} / V_{\text{max}} \text{pH}) (0.3).$$

En donde: IA es el Índice de amortiguamiento de los suelos; V_{muestra} , valor de la muestra para cada propiedad del suelo; V_{max} , valor máximo de la propiedad química correspondiente a los 98 sitios de colecta; 0.4 y 0.3 son los valores de ponderación de cada propiedad química; CIC, capacidad de intercambio catiónico; MO, materia orgánica y pH del suelo.

Resultados y discusión

Características de las propiedades químicas

El pH de los suelos varía de 6.0 a 7.8 (**Figura 2a**), predominando los de alcalinidad media, favorables para la adsorción de los metales pesados (Rodríguez *et al.*, 2019); al aumentar el pH los metales disminuyen la solubilidad y su biodisponibilidad (Alloway, 2013); la movilidad de los metales es afectada por los cambios de pH (Tandy *et al.*, 2004; Uchimiya *et al.*, 2010 y Rodríguez *et al.*, 2019). La movilidad aumenta a pH

ácido (Dijkstra *et al.*, 2004; Hauser *et al.*, 2005; Vogeler y Thayalakumaran, 2005; Martín-Ortiz *et al.*, 2010; Polubesova *et al.*, 2010; Porsche *et al.*, 2010).

La MO varía de muy baja (0.9%) a muy alta (26.6%), predominando valores de 4% a 9% (**Figura 2b**). Ortiz-Villanueva y Ortiz (1990) menciona que los suelos con más de 20% de MO se les consideran orgánicos. He *et al.* (2015); Jaramillo (2002) y Alloway (2013) indican que la MO es un componente reactivo que adsorbe tan fuerte a algunos elementos tóxicos formando complejos órgano mineral y dejándolos no disponibles, por su capacidad de formar quelatos. Al disminuir la MO en los usos del suelo habitacional, industrial, reserva y polvo urbanos, el pH es más alcalino.

La CIC presentó clase baja (6.4) a muy alta (54.6) cmol (+) kg^{-1} , dominan valores entre 10 cmol (+) kg^{-1} y 40 cmol (+) kg^{-1} , de los cuales, los polvos urbanos presentaron los mejores valores de CIC (**Figura 2c**). De acuerdo con Ortiz-Villanueva y Ortiz (1990) entre más alto es el contenido de MO, mayor es la capacidad de intercambio catiónico. Pérez *et al.* (2017) y Sánchez (2003) hacen notar que cuanto mayor sea la CIC, mayor será la capacidad del suelo para fijar metales y a su vez, la capacidad amortiguadora será alta; además, de que la CIC depende del tipo de arcillas y pH. Yong *et al.* (1990) menciona que la CIC es un indicador de la capacidad amortiguadora de los suelos.

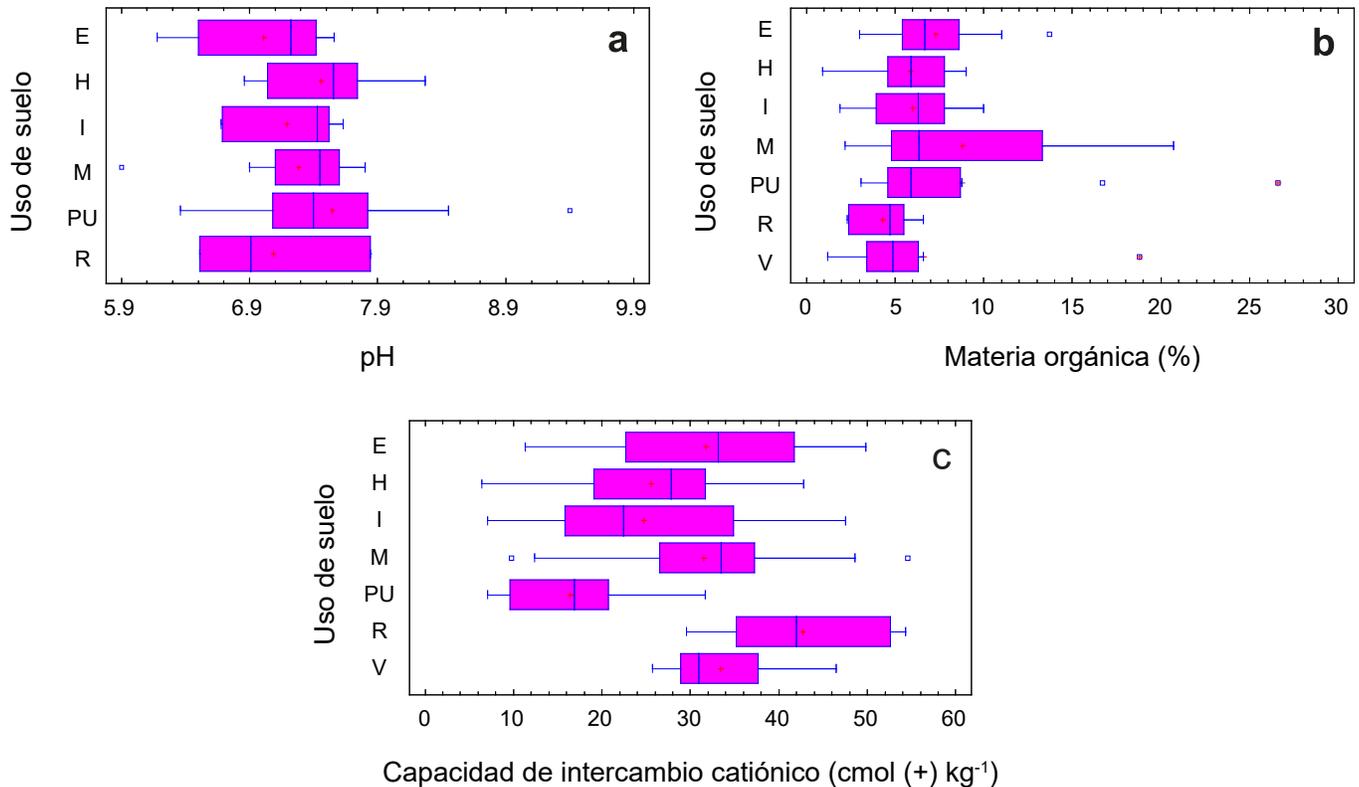


Figura 2. Uso del suelo y propiedades químicas de los suelos volcánicos. E: equipamiento, H: habitacional, I: industrial, M: mixto, PU: polvo urbano, R: reserva y V: área verde.

A partir del análisis de ANOVA, el test de Kruskal-Wallis en relación con la igualdad de medianas, la CIC en los diferentes usos de suelo obtuvo un valor de $p < 0.05$ con una confianza de 95%, lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas, a excepción del pH y MO en donde el valor de p fue > 0.05 .

Distribución espacial de las propiedades químicas

pH. Se obtuvieron cinco clases de pH, desde ácidos (6.5) a alcalinos (7.7). Las clases con pH de 7.2 a 7.4 se distribuyen en 58% del área, los neutros (7.0 a 7.2), principalmente en los extremos de la ciudad y los básicos medios (7.4 a 7.7) al centro-oeste y norte (Figura 3).

Se presentaron cinco clases de MO, desde muy baja a muy alta (Figura 4). La clase dominante fue la baja, distribuida en 82.7% de la superficie del área de estudio, la clase media se localiza en la zona centro de norte a sur, en cambio, las clases alta y muy alta, se distribuyen en zona puntuales en los usos de suelo mixto, área verde y polvo urbano.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Se presentan cinco clases de CIC, de muy baja (9.6 a 17.6 cmol (+) kg^{-1}) a muy alta (41 a 50 cmol (+) kg^{-1}) (Figura 5). Las clases baja y media ocupan 62% ubicadas de la parte central de la ciudad de Morelia hacia el exterior, lo cual, disminuye su capacidad para fijar metales. La clase alta y muy alta ocupan 28.7% de la superficie y se encuentran al centro y sur de la ciudad en espacios pequeños cerca de las colonias Vista Bella, Centro y Obrera de la ciudad de Morelia en donde se aprecia que entre más alto es el contenido de MO, mayor es el de la CIC, lo cual coincide con lo señalado por Ortiz-Villanueva y Ortiz (1990) quien hace notar que entre más alto es el contenido de MO mayor disponibilidad habrá de intercambiar cationes, lo cual influye en la capacidad del suelo para fijar metales.

Índice de Amortiguamiento y su distribución espacial

Se obtuvieron cinco clases del IA (Figura 6), el de clase baja ocupa 75.5% de la superficie y se distribuye junto con la clase muy baja en áreas con menor influencia

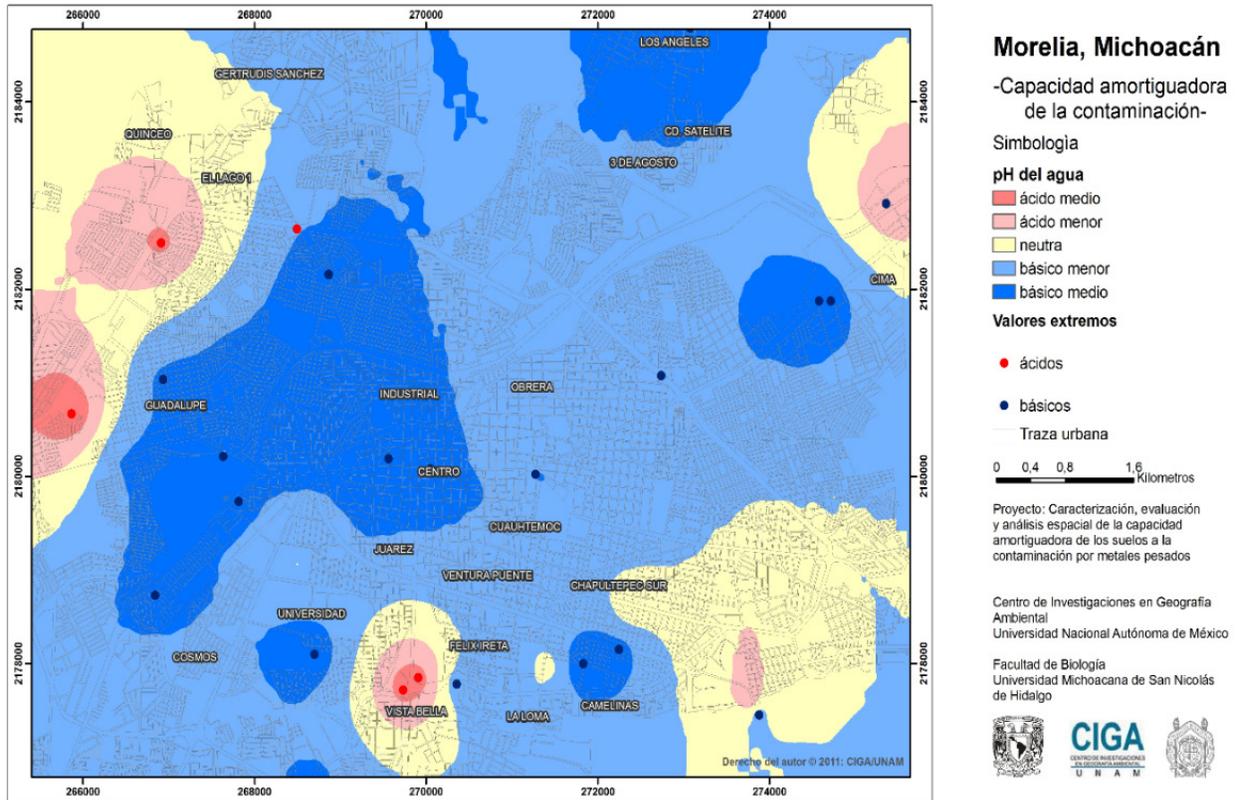


Figura 3. Distribución espacial del pH en H₂O de suelos urbanos.

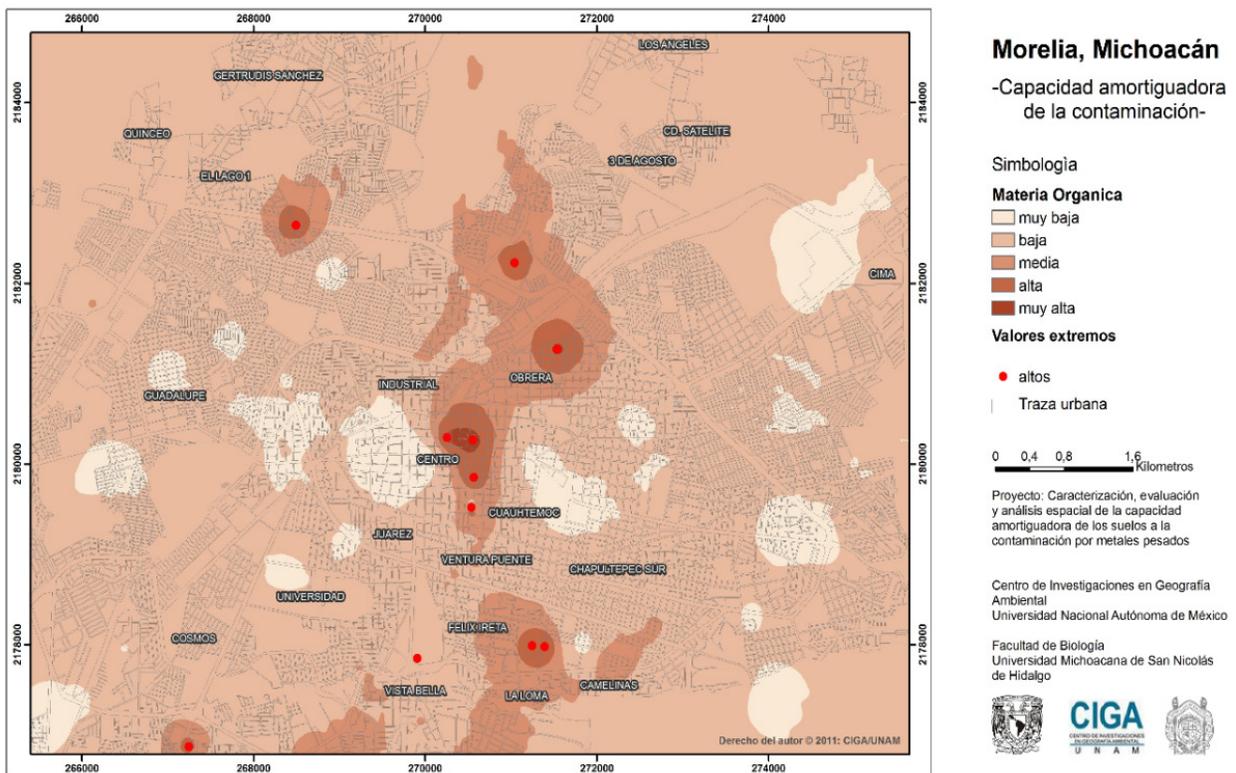


Figura 4. Distribución espacial de materia orgánica en suelos urbanos.

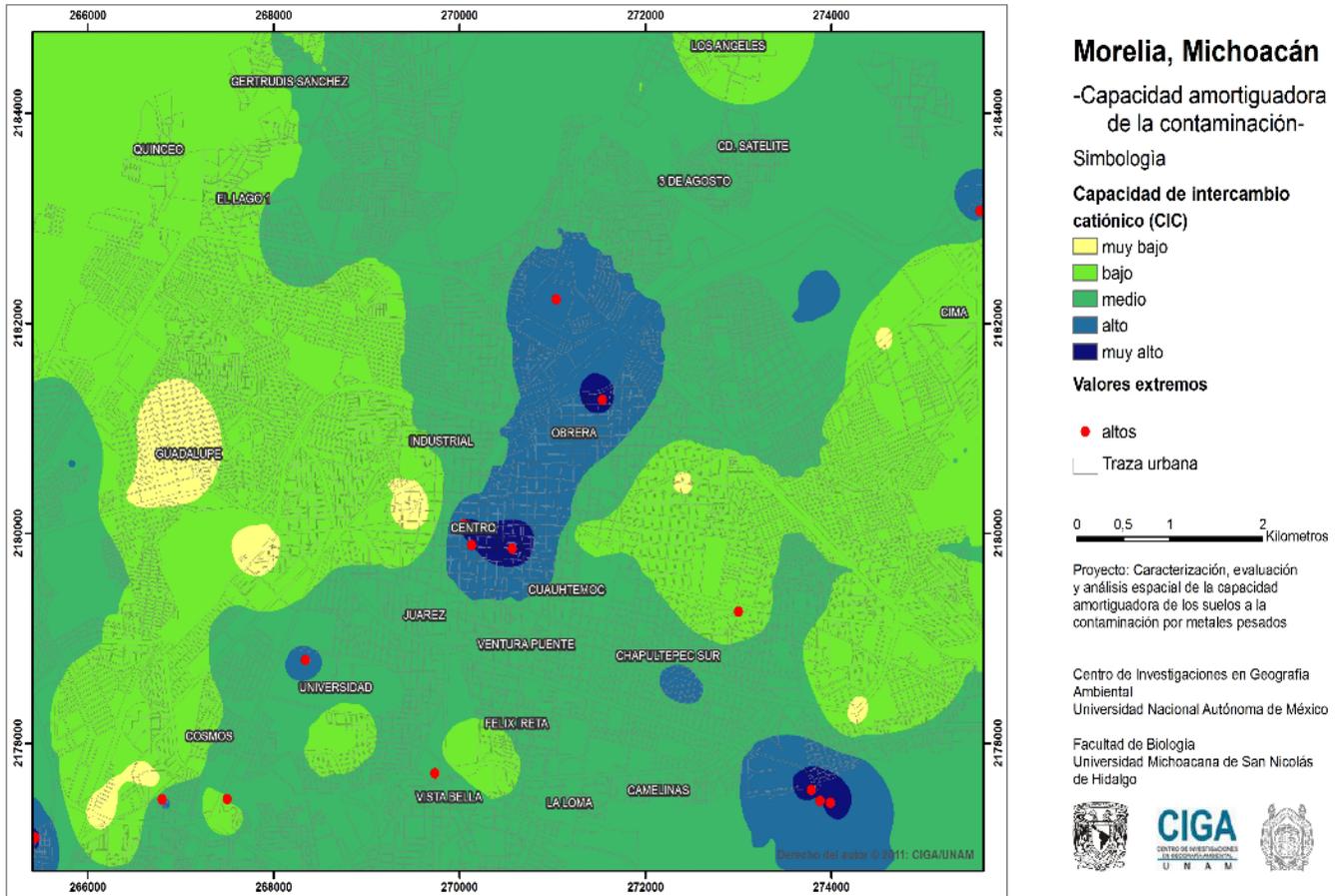


Figura 5. Distribución espacial de la capacidad de intercambio catiónico en suelos urbanos.

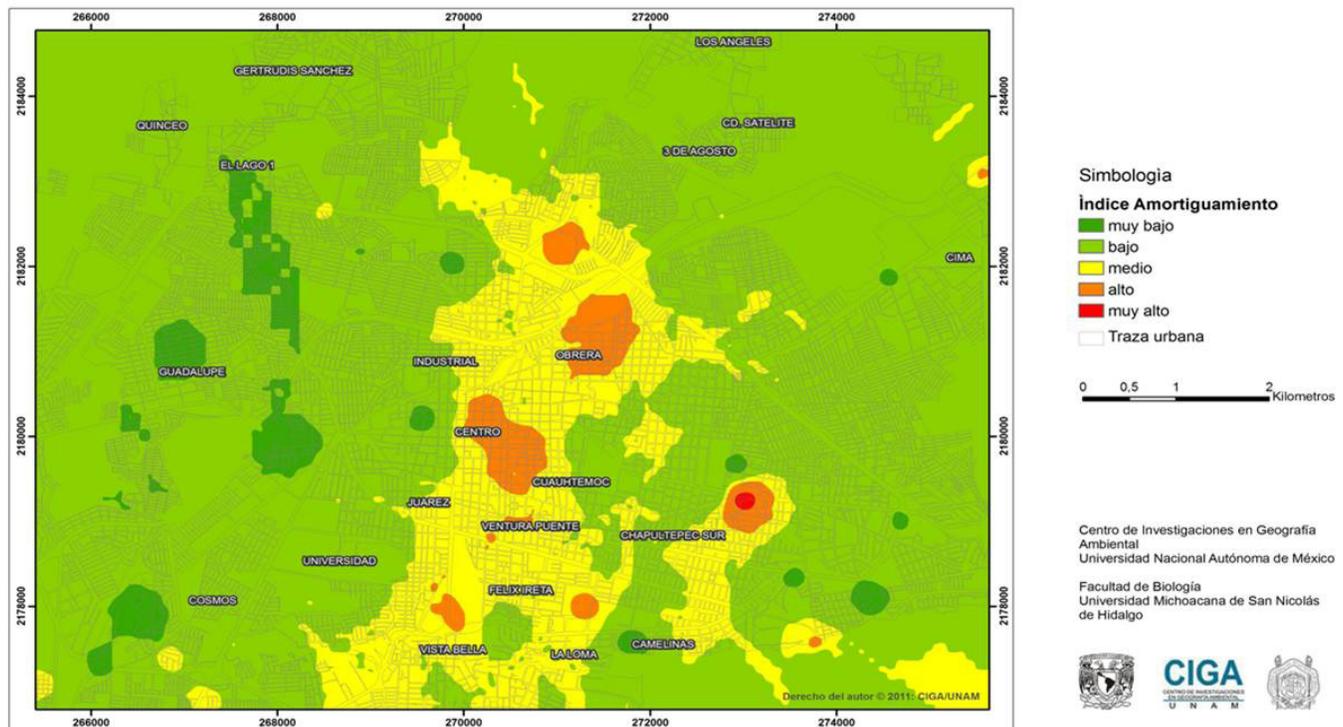


Figura 6. Distribución espacial del índice de amortiguamiento en suelos urbanos.

vehicular en comparación con la franja que va de norte a sur cuyo IA es de clase media, el cual se localiza en el centro y avenidas principales de la ciudad de Morelia en donde los medios contaminantes como el humo vehicular, estacionamientos y abastecimiento de gasolina son frecuentes. Por la superficie que ocupan y su distribución, en las clases del IA bajas (0.31 a 0.42) es más fácil detectar las áreas de contaminación, sin embargo, el daño ocasionado a la población puede ser mayor, dado que la MO en estas zonas es de baja a muy baja y junto con la CIC tienen menor capacidad de amortiguamiento.

Las clases alta (0.58 a 0.75) y muy alta (0.76 a 0.86) del IA, coinciden con las clases alta a muy alta de MO (10.44% a 17.80%) y de la CIC (33.71 cmol kg⁻¹ a 49.70 cmol kg⁻¹), tanto en superficie como en ubicación. Pérez *et al.* (2017) mencionan que la capacidad de amortiguamiento del suelo depende tanto de la CIC, pH y de las cargas de las arcillas, sin embargo, los valores altos se presenta en áreas reducidas principalmente en los usos de suelo *área verde, equipamiento, mixto y polvo urbano* en pocas muestras, áreas en las que la contaminación será menos notoria, así como menor será el daño que provoquen a la población, ya que los metales pesados quedan retenidos en las partículas de suelo, debido a la alta capacidad amortiguadora que tienen las propiedades químicas.

Conclusiones

Las propiedades químicas de los suelos en los diferentes usos difieren, el pH que domina es el medianamente alcalino, la clase de MO predominante es la media, se relacionan inversamente con el pH en algunos casos, la CIC oscila de 10 a 40 cmol kg⁻¹ clase media a alta y presenta una relación directa con la materia orgánica.

Las clases bajas de MO, CIC e IA dominan en la ciudad de Morelia y limitan la capacidad amortiguadora ante los metales pesados en una mayor área, lo cual incrementa el daño a la población humana expuesta a la contaminación de suelos y polvos urbanos.

Referencias

Alloway BJ (2013). Heavy metals in soils, trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3ra edición. Springer, Reading, Reino Unido, 587 pp.

Aguilar Y, Bautista F, Díaz-Pereira E (2011). Soils as

natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and subtropical agroecosystems* 13(2):199-210 Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México.

Alcalá J, Sosa M, Moreno M, Rodríguez JC, Quintana C, Terrazas C, Rivero O (2009). Metales pesados en suelo urbano como un indicador de la calidad ambiental: Ciudad de Chihuahua, México. *Multequina* 18(2):53-69.

Bautista F, Aguilar Y, Marrufo R, Cabañas-Vargas D, Gamboa-Marrufo M (2007). A FAST Diagnostic of urban soils contamination by heavy metals in Merida, Yucatán, México.

Bautista F, Campuzano E, Delgado C, Gogitchaichvili A (2017). Índices de adsorción de metales pesados en suelos urbanos: el caso de Morelia, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 69(2):433-445.

Carrasquero-Durán A (2006). Determinación de los niveles de contaminación con plomo en los suelos y polvo de las calles de la ciudad de Maracay. *Agronomía Trop.* 56:237-252. Disponible en <http://www.scielo.org.ve/pdf/at/v56n2/art06.pdf>.

Castro BC, Bauer LI, Trinidad SA, Carrillo GR (2007). Cadmio, Plomo, Níquel y Zinc en suelos del parque desierto de los Leones. *TERRA Latinoamericana* 25:95-103.

Covarrubias SA, Peña CJJ (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Int. Contam. Ambient* 33:7-21. doi: 10.20937/RICA.2017.

Delgado M del C, Israde Alcántara I, Bautista Zuñiga F, Gogichaishvili A, Márquez Herrera C, Cejudo R, Morales J, González I (2015). Metales pesados en suelos urbanos de Morelia, Michoacán: influencia de los usos de suelo y tipos de vialidad. *Ciencia Nicolaita* (65):120-138.

Delgado C, Bautista F, Gogichaishvili A, Cortes JL, Quintana P, Aguilar D, Cejudo R (2019). Identificación de las zonas contaminadas con metales pesados en el polvo urbano de la Ciudad de México. *Rev. Int. Contam. Ambie* 35(1):81-100.

DETENAL (Dirección de Estadística del Territorio Nacional) (1979). Carta Edafológica E14A23 Morelia. Esc. 1:50 000.

Dijkstra JJ, Meeussen J, Comans R (2004). Leaching of Heavy Metals from Contaminated Soils: An Experimental and Modeling Study. *Environmental Science & Technology* 38(16):4390-4395.

ESRI (2004). Arc GIS 9, Getting Started with ArcGIS. Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, USA.

- Fernández-Bremauntz A, Yarto-Ramírez M, CastroDíaz J (2004). Las sustancias tóxicas persistentes. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México, México, 260 pp.
- Flores-Ramírez R, Rico-Escobar E, Núñez-Monreal JE, García-Nieto E, Carrizales L, Ilizaliturri-Hernández C, Díaz-Barriga F (2012). Children exposure to lead in contaminated sites. *Salud Publica Mex* 54:383-392.
- Galán EH, Romero A (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *MACLA, revista de la Sociedad Española de Mineralogía* 10:48-60.
- Garduño Monroy VH (2004). Contribuciones a la Geología e impacto ambiental. Morelia, Mich., México. 276 pp.
- Hauser L, Tandy S, Schulin R, Nowack B (2005). Column extraction of heavy metals from soils using the biodegradable chelating agent EDDS. *Environmental Science and Technology* 39(17):6819-6824.
- He S, He Z, Yang X, Stoffella P, Baligar V (2015). Soil biogeochemistry, plant physiology, and phytoremediation of cadmium contaminated soil. *Advances in Agronomy* 134:135–225.
- IUSS Working Group WRB (2015). Base referencial mundial del recurso suelo.6 (2014). actualización e (2015). Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Jaramillo JDF (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Medellín. 613.
- Jordanova D, Godu S, Kotsev T, Jordanova N (2013). Contaminación industrial de suelos aluviales cerca del sitio minero de Fe-Pb revelada por estudios magnéticos y geoquímicos. *Geoderma* 192(1):237-248.
- Lee C, Chon H, Jung M (2001). Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au–Ag–Pb–Zn mine in Korea. *Appl. Geochem.* 16(11-12):1377-1386.
- Machado A, García N, García C, Acosta L, Cordova A, Linares M, Giradoth D, Velásquez Y (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Rev. Int. Contam. Ambient* 24(4):171-182.
- Martín-Ortiz D, Hernández-Apaolaza L, Gárate A (2010). Wheat (*Triticum aestivum* L.) response to a zinc fertilizer applied as zinc lignosulfonate adhered to a NPK fertilizer. *J. Agric. Food Chem.* 58(13):7886-7892.
- McCauley A, Jones C, Jacobsen J (2009). Soil pH and organic matter. Nutrient management modules 8. Montana State University Extension Service. http://store.msuxextension.org/publications/agandnaturalresources/4449/4449_8.pdf.
- Méndez-Romero F, Gisbert-Blanquer J, García-Díaz J, Marqués-Mateu A (2003). Relación estadística entre metales pesados y propiedades de suelos de cultivo regados con aguas residuales no depuradas. *INCI, Caracas* 28(5):281-286.
- Morton-Bermea O (2006). Contenido de metales pesados en suelos superficiales de la Ciudad de México. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 9(1):45-47.
- NOM-021-RECNAT-2000 (2002). Norma Oficial Mexicana de suelos que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación del 31 de diciembre de 2002.
- Ortíz-Villanueva B, Ortíz SCA (1990). Edafología. 7ª edición en español. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. México.
- Pérez RA, Galvis A, Bugarín R, Hernández T, Vázquez MA, Rodríguez A (2017). Cation exchange capacity: description of the silver thiourea method (AgTU+ n). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(1):171-177.
- Polubesova T, Eldad Sh, Chefetz B (2010). Adsorption and oxidative transformation of phenolic acids by Fe (III)-montmorillonite. *Environmental Science & Technology* 44(11):4203-4209.
- Porsche K, Dippon U, Rijal M, Appel E, Kappler A (2010). In-situ magnetic susceptibility measurements as a tool to follow geomicrobiological transformation of Fe minerals. *Environmental Science & Technology* 44(10):3846-3852.
- Puga S, Sosa M, Lebgue T, Quintana C, Campos A (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología aplicada* 5(1-2):149-155.
- Reyez Guzmán M (2010) Comportamiento de los metales pesados en el suelo. *Épsilon* 15:181-189.
- Rodríguez N, McLaughlin M, Pennock D (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO.
- Romero FM, Gutiérrez-Ruiz M (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 64:43-53.
- Sánchez MI (2003). Determinación de metales pesados en suelos de Medina del campo (Valladolid). Contenidos

extraíbles, niveles de fondo y de referencia. Tesis de Doctorado. Universidad de Valladolid.

Tandy S, Bosart K, Muller R, Ritschel J, Hauser L, Schulin R, Nowack B (2004). Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents. *Environmental Science & Technology* 38(3):937- 944.

Uchimiya M, Lima I, Klasson T, Chang S, Wartelle LH, Rodgers J (2010). Immobilization of heavy metal ions (CuII, CdII, NiII, and PbII) by Broiler Litter-derived biochars in water and soil. *J. Agric. Food Chem.* 58(9):5538-5544.

Vogeler I, Thayalakumaran T (2005). Transport and reactions of ESTA in soils: experiments and modeling. In: *Biogeochemistry of Chelating Agents*, vol 910. ACS Symposium Series, vol 910. American Chemical Society, pp

316-335. doi:10.1021/bk-2005-0910.ch019.

Volke-Sepulveda T, Velasco-Trejo JA, De la Rosa-Pérez DA (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México, México. 144 pp.

Yong RN, Warkentin BP, Phadungchewit Y, Galvez R (1990). Buffer capacity and lead retention in some clay. *Water, Air, and Soil Pollution.* 53:53-67.

Zeng F, Ali S, Zhang H, Ouyang Y, Qiu B, Wu F, Zhang G (2011). The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. *Environmental Pollution* 159(1):84-91.



Evaluación de distintos sensores de vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo de una plantación de *Pinus greggii* con fines de restauración ecológica

Evaluation of different sensors for unmanned aerial vehicles for monitoring a *Pinus greggii* plantation for ecological restoration purposes

Diana Santillán Gaona¹, José Luis Gallardo Salazar² , Cuauhtémoc Sáenz Romero³ , Roberto A. Lindig Cisneros^{4*} 

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Unidad San Juanito Itzicuaru. Av. San Juanito Itzicuaru s/n. Colonia Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58337.

³ Instituto de Investigaciones Sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. San Juanito Itzicuaru s/n. Colonia Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58337.

⁴ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

Historial

Manuscrito recibido: 29 de julio de 2024

Manuscrito aceptado: 25 de septiembre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Roberto A. Lindig Cisneros

e-mail: rlindig@iies.unam.mx

ORCID: 0000-0003-2542-7038

Resumen

En el campo de la restauración ecológica, una correcta evaluación de las plantaciones forestales es de gran importancia para determinar si se han cumplido las metas del proyecto. El objetivo del presente estudio fue monitorear esfuerzos de restauración temprana en sitios degradados mediante el uso de imágenes de alta resolución capturadas con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT). Se realizó una clasificación supervisada sobre dos ortomosaicos, uno construido con imágenes en el espectro visible (RGB por sus siglas en inglés) y otro con imágenes multiespectrales. Los datos obtenidos con cada imagen se compararon estadísticamente. La imagen RGB resultó mejor cuando se compararon los árboles vivos contra los árboles estresados y muertos. El uso de VANT es una opción viable para la evaluación temprana de plantaciones forestales.

Palabras clave: dron, supervivencia, evaluación, desempeño, reforestación.

Introducción

La evaluación de plantaciones forestales tanto con fines productivos como de restauración ecológica es de gran importancia para determinar si se cumplió con los objetivos planteados en cada proyecto (Nuzzo y Howell

Abstract

In the field of ecological restoration, a proper evaluation of forest plantations is of great importance to determine whether the project's goals have been met. The objective of this study was to monitor early restoration efforts in degraded sites using high-resolution images captured with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). A supervised classification was carried out on two orthomosaics, one constructed with red, green, and blue (RGB) images and the other with multispectral images. The data obtained from each image were statistically compared. The RGB image was better when comparing live trees against stressed and dead trees. The use of UAVs is a viable option for the early assessment of forest plantations.

Keywords: drone, survival, assessment, performance, reforestation.

1990; Ramírez *et al.*, 2015; Yoccoz *et al.*, 2001). Para el monitoreo, históricamente se han usado diversos métodos sobre el terreno que evalúan una variedad de aspectos del desempeño de las plantas, como la supervivencia y el crecimiento (Lindig-Cisneros, 2007), estas técnicas

pueden requerir de un esfuerzo considerable, limitando tanto el número de evaluaciones a lo largo del proyecto como del área que se puede trabajar. Una tecnología prometedora para hacer más eficiente este proceso son los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT).

El uso de VANT representa una oportunidad de innovación, ya que permite obtener información de alta resolución con capacidad de análisis de árboles individuales (Gallardo-Salazar *et al.*, 2021). Se ha aplicado para reconocer parámetros ecológicos para la detección temprana del estado fitosanitario, la determinación de las condiciones de fenología vegetal y síntomas de decaimiento y mortalidad forestal posiblemente atribuibles al cambio climático (Torresan *et al.*, 2017; Dash *et al.*, 2018; Brovkina *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2019), utilizando distintos tipos de sensores (Shin *et al.*, 2019; Webster *et al.*, 2018; Näsi *et al.*, 2018).

En este sentido, la literatura científica reporta el uso de diversos índices de vegetación, con aplicaciones recientes de los VANT (de Castro *et al.*, 2021). Dichos índices son aproximaciones del crecimiento, vigor y dinámica de la vegetación. De hecho, Ecke *et al.* (2022) reportaron la aplicación de VANT en el monitoreo de la salud forestal través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), calculado a partir de la banda del borde rojo, mostrando ser más sensible a los cambios fisiológicos en los pigmentos de las hojas de pinos. No se ha probado la utilidad de esta tecnología para la evaluación de plantaciones forestales en etapas tempranas, en particular en países megadiversos como México (Gallardo-Salazar *et al.*, 2020), por lo que en el presente estudio se probó la utilidad de los VANT para evaluar plantaciones a un año de establecidas por medio de dos sensores, visible y multiespectral y se compararon los resultados con evaluación en campo a través de evaluación visual y georreferenciación, con la finalidad de determinar si el uso de sensores es más eficaz para el monitoreo y cuál sensor (visible o multiespectral) es más adecuado.

Se espera que mediante imágenes de alta resolución del espectro visible y multiespectrales capturadas con drones, se logró diferenciar los árboles vivos, muertos o con algún nivel de estrés que fueron recientemente plantados en las parcelas. Ello bajo el supuesto de que los valores altos del índice de vegetación de diferencia normalizada en el follaje sano están asociados con la actividad fotosintética (Cristiano *et al.*, 2014; Gamon *et al.*, 2015), debido al contraste de la baja reflectancia de la hoja en la banda roja que ocurre con una mayor absorción de clorofila y una alta reflexión infrarroja dentro de la

capa de mesófilo esponjoso (Rullan-Silva *et al.*, 2013). Los valores de NDVI disminuyen con la senescencia del follaje, lo que se asocia con una mayor reflectancia en la banda roja (di Bella *et al.*, 2004; Chavana-Bryant *et al.*, 2017), de manera que esta tecnología pudiera ser una opción promisoriosa para la evaluación temprana de plantaciones forestales y monitoreo de esfuerzos de restauración en sitios degradados.

Materiales y métodos

El ejido Coro Grande está localizado en el noroeste del municipio de Morelia, Michoacán (19°45.7262'N 101°23.9480'W, **Figura 1**), a una altitud que va de los 2135 msnm a los 2325 msnm, y un área total de 1385.66 ha. La cobertura vegetal de la comunidad está dominada por agricultura de temporal (1035.53 ha); sin embargo, también está presente la agricultura de riego, bosque de encino con vegetación secundaria, matorral con vegetación secundaria, matorral, y, por último, pastizal inducido con matorral. El clima presente en la comunidad, según García y CONABIO (1998), es el templado, subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, así como una temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. Sin embargo, se pueden diferenciar dos tipos de precipitación dentro del área del polígono; una de ellas, y la que se encuentra en la gran mayoría de la superficie (94% de ésta), se caracteriza por una precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10% del total anual; mientras que el otro 6% le corresponde a aquella que cuenta con una precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

A finales del 2020, con la participación de los habitantes de la comunidad se cercó una parcela de 7.9 ha, ubicada en el sureste de la comunidad; esto con el propósito de evitar que el ganado bovino y equino que habita en la comunidad causara daños en la reforestación. En esta parcela se plantaron individuos de: *Pinus greggii*, *Leucaena leucocephala*, *Albizia plurijuga*, *Quercus* spp., *Fraxinus udhei*, *Prosopis* sp. y *Agave cupreata*. En septiembre de 2021 se inició el monitoreo de los individuos de *Pinus greggii* porque para esta especie se contaba con un número adecuado de individuos agrupados en un área de 2,982.12 m² (**Figura 2**), registrando el estado del individuo (muerto, vivo o estresado), cada individuo fue georreferenciado con

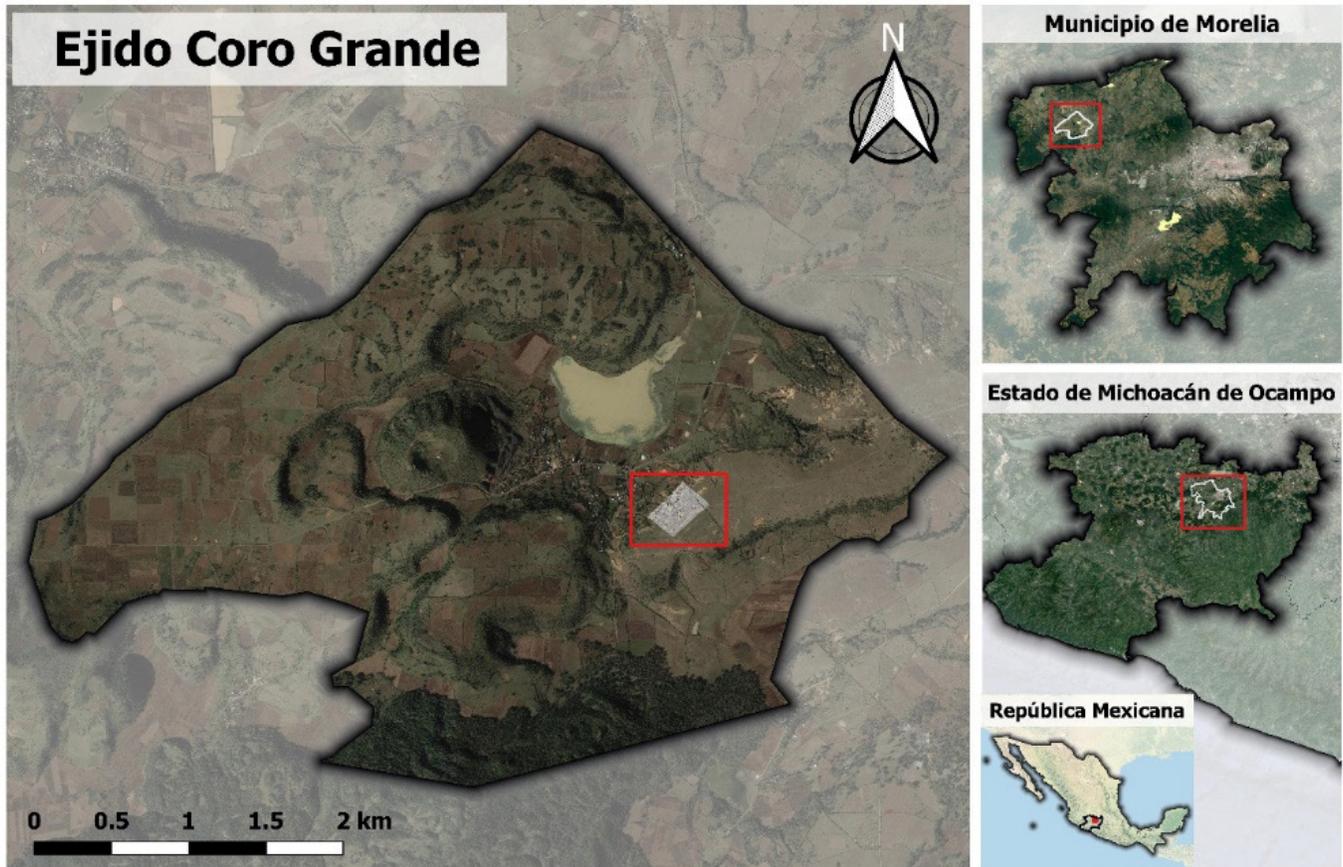


Figura 1. Ubicación del ejido Coro Grande y parcela de experimentación en el Municipio de Morelia, Michoacán (elaborado con imágenes de Google Earth® e imágenes propias de VANT).

un sistema de posicionamiento global (GPS). El día 9 de marzo del 2022 se llevó a cabo un conteo visual en terreno como parte del monitoreo antes mencionado, el tiempo empleado fue de 1.5 horas. Este conteo se llevó a cabo por uno de nosotros de manera independiente y los resultados no se compartieron con quien realizó la valoración visual en pantalla de las imágenes obtenidas con el sensor RGB y sensor multiespectral.

Para la obtención y procesamiento de imágenes de vehículos aéreos no tripulados, se utilizaron dos cuadricópteros de la marca Dà-Jiāng Innovations (DJI), modelos Phantom 4 Pro (P4P) y Phantom 4 Multiespectral (P4M). La cámara del P4P tiene un sensor de 1 pulgada con distancia focal de 24 mm y 20 MP, con sensores RGB (en el espectro de luz visible). Por su parte, el P4M tiene un total de seis sensores: cinco multiespectrales (ej. azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) y uno RGB, todos con un obturador global de 2 MP (**Tabla 1**). La distancia focal de la cámara del P4M es de 5.74 mm (P4 multiespectral, 2020). El P4M ha demostrado

una buena precisión, rendimiento y generación de datos consistentes comparado con otros modelos de cámaras multiespectrales (Lu *et al.*, 2020).

El P4P y el P4M operan bajo el principio de georreferenciación directa a bordo, al estar equipados con GPS que geoetiqueta con coordenadas para cada imagen adquirida. Esto indica que las imágenes adquiridas fueron georreferenciadas directamente por la capacidad GPS

Tabla 1. Información espectral de las bandas para el VANT DJI Phantom 4 Multiespectral (P4M).

Banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de longitud de onda (nm)
Azul	450	32
Verde	560	32
Rojo	650	32
Borde rojo	730	32
Infrarrojo cercano	840	52

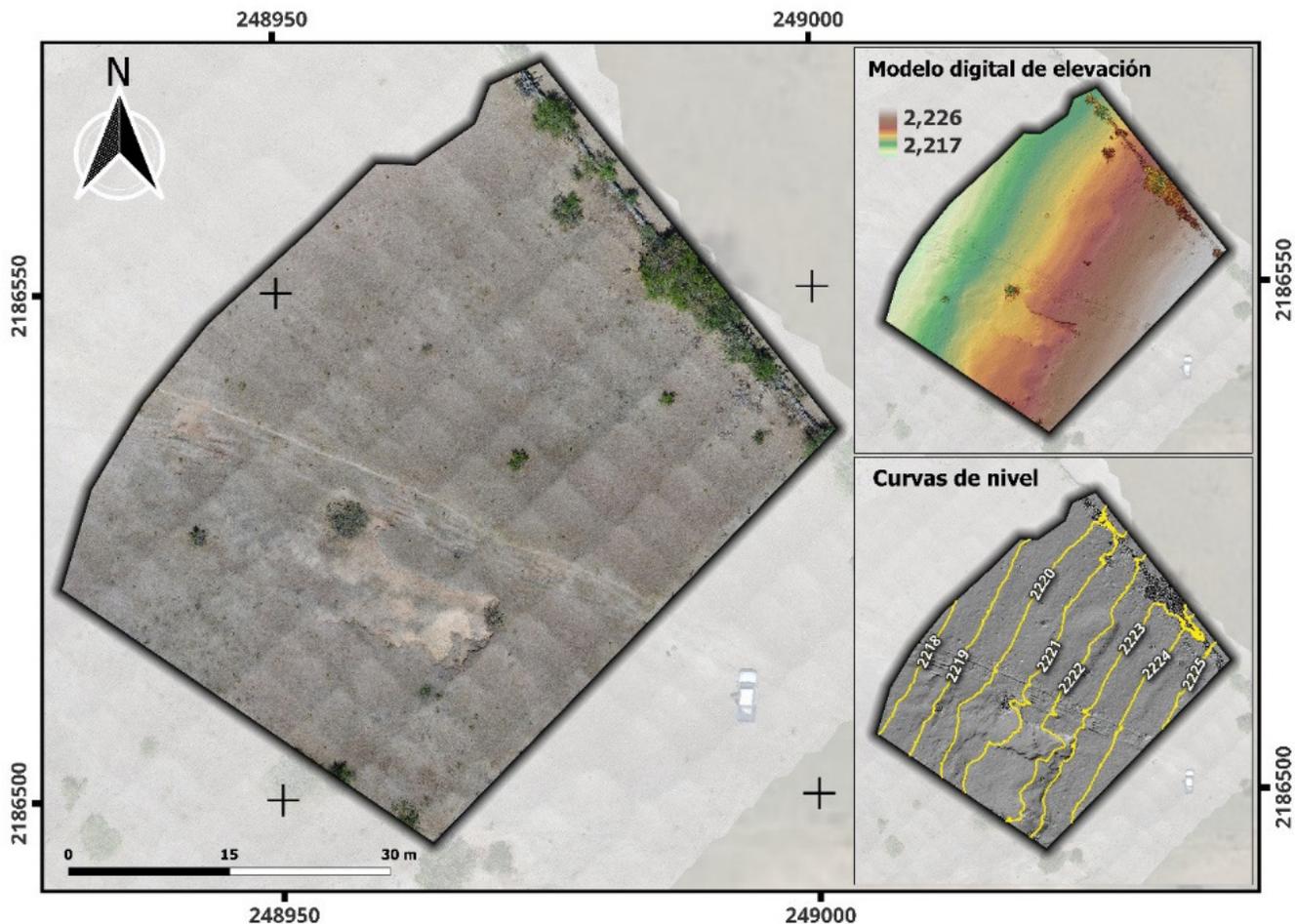


Figura 2. Parcela de experimentación para el análisis de *Pinus greggii* en el Ejido de Coro Grande, el sitio fue cercado para protegerlo del ganado. Se encuentra en una ladera con una pendiente moderada con orientación al noroeste.

durante la misión de vuelo (Syetiawan *et al.*, 2020). No fue necesario utilizar el sistema cinemático en tiempo real (RTK) debido a que el fabricante reporta que el sistema de georreferenciación puede alcanzar una precisión de ubicación vertical y horizontal de ± 0.1 y ± 0.3 m, respectivamente (P4 Multispectral Specs, 2020).

Las misiones de vuelo se ejecutaron el día 9 de marzo de 2022, lo que coincide con la temporada seca y cálida en esta región del país y tuvieron una duración de 22 minutos, a lo que se puede sumar el tiempo de programación del vuelo que fue de 10 minutos. Ello reúne características apropiadas para evaluar las condiciones de estrés de la reforestación y evitar interferencias y confusión en la imagen por la vegetación herbácea o arbustiva. El plan de vuelo para la adquisición automática de imágenes se programó con la aplicación Pix4DCapture (Pix4DCapture, 2022) para volar el P4P;

mientras que DJI Ground Station fue utilizada para el P4M (DJI Ground Station Pro., 2020). Los parámetros de vuelo fueron: traslape frontal y lateral de 80%, la altura de vuelo fue de 16 m sobre el nivel del suelo (AGL) con un ángulo de cámara de 90° . Los vuelos se realizaron en condiciones de sol y cielo despejado (sin nubes), lo más cerca posible del mediodía para evitar la interferencia de sombras, con velocidades del viento inferiores a 5 km/h.

Apartir de las imágenes RGB del P4P y multispectrales capturadas con el P4M, se aplicaron procedimientos fotogramétricos y de visión por computadora utilizando el software libre y de código abierto OpenDroneMap (ODM) (OpenDroneMap., 2022). Los resultados de ODM y las opciones comerciales son equiparables. Sin embargo, la licencia gratuita, múltiples opciones de personalización, disminución del tiempo de procesamiento y documentación disponible, hacen de

ODM una opción atractiva (Groos *et al.*, 2019). Este software implementa los algoritmos modernos *Structure from Motion* (SfM) y *Multi-View Stereo* (MVS), para estimar modelos 3D a partir de secuencias de imágenes 2D con un alto porcentaje de traslape (Deliry y Avdan, 2021) que se utilizan para construir un ortomosaico (Burdziakowski, 2017; Lee y Yu, 2018). Este proceso generó los ortomosaicos RGB, multiespectrales, modelos digitales de superficie y terreno del sitio de estudio.

A partir del ortomosaico multiespectral generado con las fotografías capturadas con el P4M, se calculó el NDVI, ello mediante la calculadora ráster de QGIS (Rosas-Chavoya *et al.*, 2022). El NDVI es uno de los índices más utilizados e implementados, calculado a partir de información multiespectral como relación normalizada entre las bandas roja e infrarroja cercana (Huang *et al.*, 2021). Matemáticamente, el NDVI se expresa de la siguiente manera:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

Dónde *NDVI* es el índice de vegetación de diferencia normalizado. *RED* y *NIR* es la respuesta espectral registrada con el P4M en las regiones roja (visible) e infrarroja cercana, respectivamente (Tabla 1). Los

valores de NDVI varían de -1 a 1, independientemente del uso de radiancia, reflectancia o DN como entrada. Para la clasificación de los árboles en las tres categorías se consideró que valores de 0.2 o menores corresponden a árboles muertos, de >0.2 a 0.5 árboles estresados y >0.5 árboles vivos.

El análisis estadístico para comparar la evaluación directa en campo y con el uso de VANT, se llevó a cabo con el registro de los individuos de *P. greggii* agrupados en las categorías vivo, muerto y estresado; siendo ejemplo de estas categorías los que se muestran en la **Figura 3**; para esto se realizó una prueba de χ^2 , así como una de equivalencia (Martín Andrés y Herranz Tejedor, 2004). En ambas pruebas se agruparon los datos en dos grupos: vivos vs. estresados + muertos; o vivos + estresados vs. muertos; esto con el propósito de identificar la diferencia que existe entre las distintas categorías de individuos que se identificaron tanto en observación directa en terreno y georreferenciando con GPS, como con los de interpretación visual en pantalla de los ortomosaicos generados con los sensores RGB y multiespectral de los VANT. En el caso de los análisis de equivalencia, según Frías-Navarro y colaboradores (2007), definir el valor de Delta (Δ o D) es una tarea compleja y constituye la principal dificultad en estas pruebas; esto debido a que

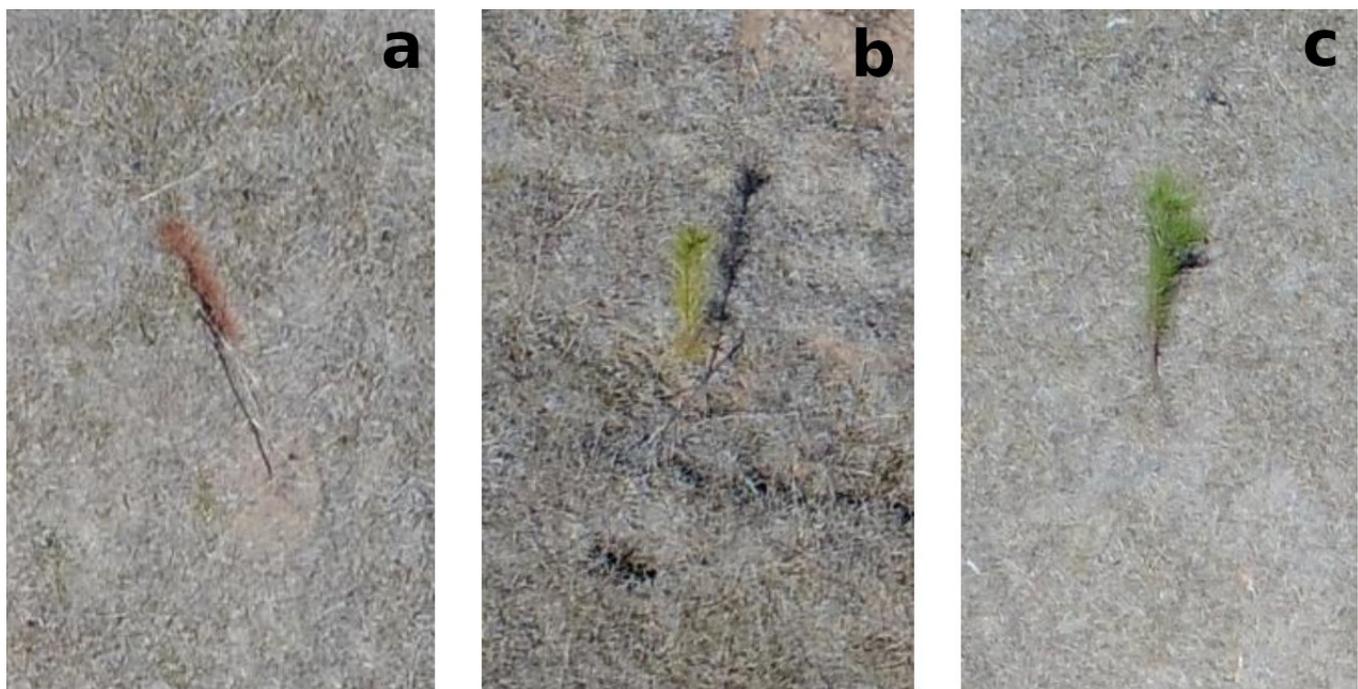


Figura 3. Categorías establecidas para los individuos de *Pinus greggii* estudiados: muerto (a), estresado (b) y vivo (c), con imágenes tomadas por el VANT como se describe en la sección de métodos (fotografías propias obtenidas con el detector RGB).

este valor se establece de acuerdo a la experiencia del investigador, tomando en cuenta que se define como la diferencia máxima entre los grupos que es aceptable en función del fenómeno estudiado (Frías-Navarro, 2007). Sin embargo, otros autores como Röhmel (2001), mencionan que los valores más usuales para Δ en estas pruebas son de 0.05, 0.10, 0.15 y 0.20; de tal forma, por lo que se consideraron estos valores de Δ .

Resultados y discusión

De acuerdo a las categorías descritas anteriormente, observadas en el censo realizado tanto en campo, como en las imágenes de distintos sensores en vehículos aéreos no tripulados, se obtuvieron los resultados que se muestran en la **Tabla 2**. El método que arrojó mayor número de individuos, 209 en total, fue el VANT con sensor RGB, seguido del VANT multiespectral y, finalmente, la evaluación visual en terreno con georreferenciación (GPS), habiendo una diferencia de 6 individuos únicamente entre ellas. Por otro lado, con todos los métodos utilizados se identificaron más individuos vivos que de las otras categorías (muertos y estresados). Con el VANT multiespectral se identificaron una mayor cantidad de individuos estresados (63), habiendo entonces una diferencia de 29 y 39 individuos con los otros dos métodos, siendo que entre el VANT RGB y el GPS solamente hubo 10 individuos de diferencia. Se calculó el NDVI de los individuos detectados con el sensor multiespectral, los resultados indican que, para los individuos muertos, el valor promedio fue de 0.144, para los estresados de 0.3792 y para los vivos de 0.5504 (**Figura 4**).

Desde una perspectiva de la distribución de los individuos de las diferentes categorías, se observó que los individuos muertos, se agrupan en el oeste del sitio reforestado, zona que además es la más cercana a cárcavas de gran tamaño localizadas dentro de la parcela de experimentación. Por otro lado, los individuos registrados como estresados y vivos, observados con los tres métodos utilizados, se encuentran distribuidos homogéneamente por toda la zona reforestada. En la **Figura 5**, se puede apreciar que el patrón es similar independientemente del tipo de detección.

En la **Tabla 3**, se compara el censo en el terreno (GPS) y el VANT RGB, y se puede apreciar que agrupando los árboles vivos con los estresados y

Tabla 2. Resultados de individuos identificados con GPS, VANT RGB y VANT multiespectral.

Método	Vivo	Estresado	Muerto	Total
VANT RGB	116	34	59	209
VISUAL EN CAMPO (GPS)	98	24	81	203
VANT Multiespectral	82	63	59	204

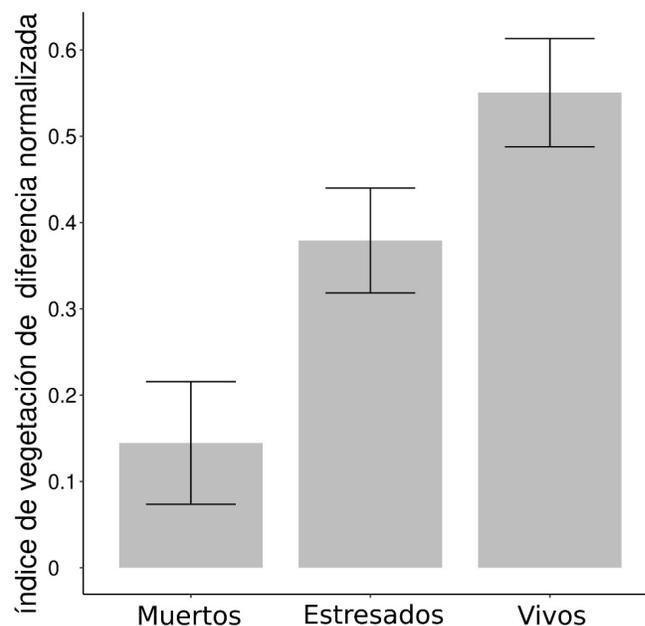


Figura 4. NDVI por categoría para los individuos detectados con el sensor multiespectral, los datos son medias y desviación estándar (tamaños de muestra: muertos = 59, estresados = 63, vivos = 82).

comparando a estos dos con los muertos la diferencia es estadísticamente significativa; agrupando los muertos y estresados y comparando con los vivos la diferencia no es significativa y las pruebas de equivalencia indican que para este último agrupamiento se puede considerar a los dos grupos equivalentes con un valor de Δ de 0.15.

Cuando se compara el censo en el terreno (GPS) y el VANT con sensor multiespectral (**Tabla 4**), es significativa la diferencia cuando se agrupan los árboles vivos con los estresados y comparando con los muertos. Al igual que con el sensor RGB, agrupando los muertos y estresados y comparando con los vivos, la diferencia no es significativa y las pruebas de equivalencia indican que para este último agrupamiento se puede considerar a los dos grupos equivalentes con un valor de Δ de 0.20.

Tabla 3. Comparación entre GPS y sensor RGB. En las pruebas de equivalencia no significativo (N.S.) indica que la diferencia entre las medias está fuera del intervalo de equivalencia indicado (Δ).

Comparación	χ^2	$\Delta=0.05$	$\Delta=0.10$	$\Delta=0.15$	$\Delta=0.20$
Vivos vs. Muertos+Estresados	0.1709	N.S.	N.S.	0.0552	0.0041
Vivos+Estresados vs. Muertos	0.01655	N.S.	N.S.	N.S.	0.0357

Tabla 4. Comparación entre GPS y sensor multiespectral. En las pruebas de equivalencia no significativo (N.S.) indica que la diferencia entre las medias está fuera del intervalo de equivalencia indicado (Δ).

Comparación	χ^2	$\Delta=0.05$	$\Delta=0.10$	$\Delta=0.15$	$\Delta=0.20$
Vivos vs. Muertos+Estresados	0.1233	N.S.	N.S.	N.S.	0.0068
Vivos+Estresados vs. Muertos	0.02594	N.S.	N.S.	N.S.	0.0265

Tabla 5. Comparación entre VANT con sensor RGB y multiespectral. En las pruebas de equivalencia no significativo (N.S.) indica que la diferencia entre las medias está fuera del intervalo de equivalencia indicado (Δ).

Comparación	χ^2	$\Delta=0.05$	$\Delta=0.10$	$\Delta=0.15$	$\Delta=0.20$
Vivos vs. Muertos+Estresados	0.0026	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Vivos+Estresados vs. Muertos	0.9628	N.S.	0.0101	0.0004	0

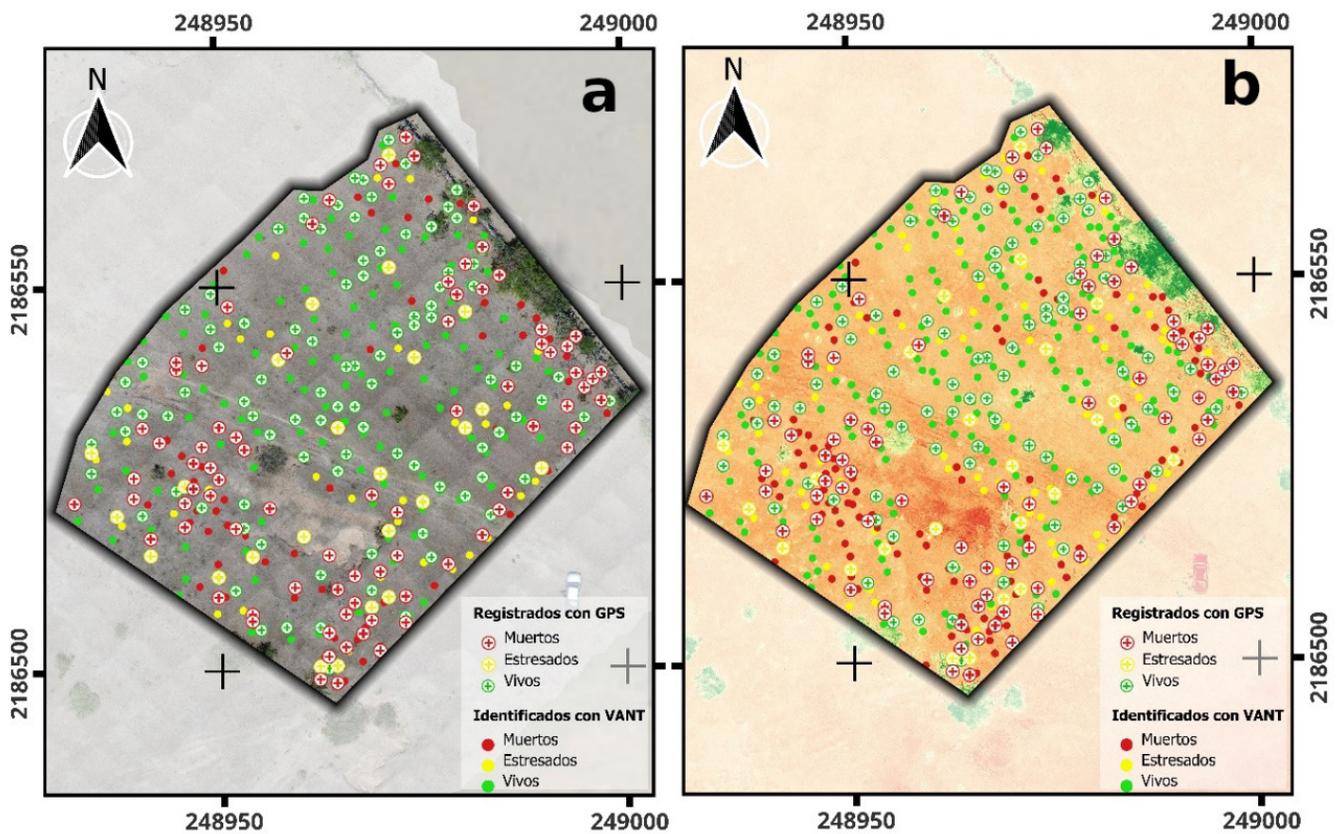


Figura 5. Agrupación de los individuos por categorías según el método utilizado. (a) individuos registrados con GPS en el terreno e individuos identificados con el VANT con sensor del espectro visible (RGB); (b) individuos registrados con GPS en el terreno e individuos identificados con el VANT con sensor multiespectral.

Finalmente, si se comparan los dos sensores de VANT, se puede apreciar que si se agrupan muertos y estresados y se compara con los vivos la diferencia es estadísticamente significativa, pero si se agrupan los vivos y estresados y se compara con los muertos los valores son equivalentes con una Δ de 0.10.

Los datos anteriores indican que los datos obtenidos con cualquiera de los sensores utilizados son equivalentes con lo observado en terreno cuando se comparan los árboles vivos en buen estado contra los árboles estresados y muertos. En términos del desempeño observado, cabe mencionar que éste es similar a lo reportado en otros ensayos en el Estado de Michoacán para esta especie (Gómez-Romero, 2012).

Conclusiones

La diferencia entre el número de individuos registrados a través de la evaluación visual en terreno con los sensores RGB y multiespectral lo atribuimos a que, cuando se hace una evaluación visual en terreno, pueden cometerse errores de conteo que solamente se pueden corregir realizando varios recorridos y marcando los árboles, lo que en muchos casos no es posible por falta de recursos y/o tiempo. El hecho de que las imágenes obtenidas con el VANT se pueden analizar más detalladamente a posteriori hace que sea más confiable la información. Es alentador que el uso de sensores RGB y multiespectral sea equivalente, dado que el primero es de menor costo que el segundo. El tiempo requerido para la evaluación con VANT fue de aproximadamente un tercio del tiempo que requirió la evaluación en campo, y es de esperarse que la diferencia sea mayor si el área a evaluar es mayor o de más difícil acceso. El uso de VANT para la evaluación temprana de plantaciones forestales es una herramienta prometedora considerando que esta tecnología ha reducido sus costos en los últimos años y que se pueden adquirir modelos económicos con detectores en el rango visible, sobre todo si es necesario evaluar un gran número de parcelas reforestadas y/o de una gran extensión.

Referencias

Brovkina O, Cienciala E, Surový P, y Janata P (2018). Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands. *Geo-Spatial Information Science* 21(1):12–20. doi:10.1080/10095020.2017.1416994.

Burdziakowski P (2017). Evaluation of open drone map toolkit for geodetic grade aerial drone mapping--case study. <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/evaluation-of-open-drone-map-toolkit-for-geodetic-grade-aerial-drone-mapping-case-study,141843-1>

Chavana-Bryant C, Malhi Y, Wu J, Asner GP, Anastasiou A, Enquist BJ, Cosio Caravasi EG, Doughty CE, Saleska SR, Martin RE, Gerard FF (2017). Leaf aging of Amazonian canopy trees as revealed by spectral and physiochemical measurements. *The New Phytologist* 214(3):1049–1063. doi:10.1111/nph.13853.

Cristiano PM, Madanes N, Campanello PI, Di Francescantonio D, Rodríguez SA, Zhang Y-J., Carrasco LO, Goldstein G (2014). High NDVI and Potential Canopy Photosynthesis of South American Subtropical Forests despite Seasonal Changes in Leaf Area Index and Air Temperature. *Forests, Trees and Livelihoods* 5(2):287–308. doi:10.3390/f5020287.

de Castro AI, Shi Y, Maja JM, Peña JM (2021). UAVs for Vegetation Monitoring: Overview and Recent Scientific Contributions. *Remote Sensing* 13(11):2139. doi:10.3390/rs13112139.

Deliry SI, Avdan U (2021). Accuracy of unmanned aerial systems photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping: A review. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 49(8):1997–2017. doi:10.1007/s12524-021-01366-x.

Di Bella CM, Paruelo JM, Becerra JE, Bacour C, Baret F (2004). Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: Experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing* 25(23):5415–5427. doi:10.1080/1431160412331269724.

DJI Ground Station Pro (2020). <http://www.dji.com/mx/ground-station-pro>.

Ecke S, Dempewolf J, Frey J, Schwaller A, Endres E, Klemmt H-J., Tiede D, Seifert T (2022). UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing* 14(13):3205. doi:10.3390/rs14133205

Feduck C, McDermid GJ, Castilla, G (2018). Detection of Coniferous Seedlings in UAV Imagery. *Forests, Trees and Livelihoods* 9(7):432. doi:10.1016/j.isrjsjprs.2020.08.005.

Frías-Navarro D, Pascual J, Monter-Bort H, Gracia-Pérez F (2007). Test de equivalencia. En DeLaFuente E, Padilla J, Gracia J (eds). Actas IX Congreso de Metodología de las Ciencias Sociales y de la Salud, 390-403. Granada: Ediciones Sider S.C. https://www.researchgate.net/publication/303855897_Tests_de_Equivalencia.

- Gallardo-Salazar JL, Pompa-García M (2020). Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322020000500027yscript=sci_arttext.
- Gallardo-Salazar JL, Carrillo-Aguilar DM, Pompa-García M, Aguirre-Salado CA (2021). Multispectral indices and individual-tree level attributes explain forest productivity in a pine clonal orchard of Northern Mexico. *Geocarto International* 37(15):4441-4453. doi:10.1080/10106049.2021.1886341.
- Gamon JA, Kovalchuk O, Wong CY S., Harris A, Garrity SR (2015). Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences Discussions* 12(3):2947–2978.
- García E (1998). Climas, escala 1000000: México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Mexico. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yesy_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no.
- Gómez-Romero M, Soto-Correa JC, Blanco-García JA (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000800005.
- Groos AR, Bertschinger TJ, Kummer CM, Erlwein S, Munz L, Philipp A, 2019, The Potential of Low-Cost UAVs and Open-Source Photogrammetry Software for High-Resolution Monitoring of Alpine Glaciers: A Case Study from the Kanderfirn (Swiss Alps). *Geosciences Journal* 9(8):356. doi:10.3390/geosciences9080356.
- Huang S, Tang L, Hupy JP, Wang Y, Shao G (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Research Journal of Forestry* 32(1):1–6. doi:10.1007/s11676-020-01155-1.
- Jiao W, Wang L, McCabe MF (2021). Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sensing of Environment* 256:112313. doi:10.1016/j.rse.2021.112313
- Lee S, Yu B-H (2018). Automatic detection of dead tree from UAV imagery. *Proceedings of the 39th Asian Conference on Remote Sensing, Kuala Lumpur, Malaysia* 15–19.
- Lin Q, Huang H, Wang J, Huang K, Liu Y (2019). Detection of Pine Shoot Beetle (PSB) Stress on Pine Forests at Individual Tree Level using UAV-Based Hyperspectral Imagery and Lidar. *Remote Sensing* 11(21):2540. doi:10.3390/rs11212540
- Lindig Cisneros RA (2017). *Ecología de restauración y restauración ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia.
- Lu H, Fan T, Ghimire P, Deng L (2020). Experimental Evaluation and Consistency Comparison of UAV Multispectral Minisensors. *Remote Sensing* 12(16):2542. doi:10.3390/rs12162542.
- Martín Andrés A, Herranz Tejedor I (2004). The Equivalence of Two Proportions Revisited. *Journal of Applied Statistics* 31(1):61–72. doi:10.1080/0266476032000148957.
- Meddens AJ H., Hicke JA, Vierling LA, Hudak AT (2013). Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 132:49–58. doi:10.1016/j.rse.2013.01.002
- Multispectral Specs. (2020). <https://www.dji.com/p4-multispectral/specs>.
- Näsi R, Honkavaara E, Blomqvist M, Lyytikäinen-Saarenmaa P, Hakala T, Viljanen N, Kantola T, Holopainen M (2018). Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban Forestry and Urban Greening* 30:72–83. doi:10.1016/j.ufug.2018.01.010.
- Nuzzo VA, Howell EA (1990). Natural area restoration planning. *Natural Areas Journal* 10(4):201–209. ISSN: 0885-8608.
- OpenDroneMap (2022). <http://www.opendronemap.org/P4>.
- Pix4DCapture (2022). <https://www.pix4d.com/es/producto/Pix4dcapture>.
- Ramírez W, Aguilar-Garavito M, Calle Z, Cabrera M (2015). Introducción al monitoreo en la restauración ecológica. En Aguilar-Garavito M, Ramírez W (editores). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres*. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9281>.
- Reis BP, Martins SV, Fernandes Filho EI, Sarcinelli TS, Gleriani JM, Leite HG, Halassy M (2019). Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images. *Ecological Engineering* 127:178–186. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.11.022.
- Röhm J (2001). Statistical considerations of FDA and CPMP rules for the investigation of new anti-bacterial products. *Statistics in Medicine* 20(17-18):2561–2571. doi:10.1002/sim.729.

Rosas-Chavoya M, Gallardo-Salazar JL, López-Serrano PM, Alcántara-Concepción PC, León-Miranda AK (2022). QGIS a constantly growing free and open-source geospatial software contributing to scientific development. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 48(1):197–213. <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/5143>.

Shin J-I, Seo W-W, Kim T, Park J, Woo C-S (2019). Using UAV Multispectral Images for Classification of Forest Burn Severity—A Case Study of the 2019 Gangneung Forest Fire. *Forests, Trees and Livelihoods* 10(11):1025. doi:10.3390/fl01111025.

Syetiawan A, Gularso H, Kusnadi GI, Pramudita GN (2020). Precise topographic mapping using direct georeferencing in UAV. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 500(1):012029.

Torresan C, Berton A, Carotenuto F, Di Gennaro SF, Gioli B, Matese A, Miglietta F, Vagnoli C, Zaldei A, Wallace L (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing* 38(8-10):2427–2447. doi:10.1080/01431161.2016.1252477.

Webster C, Westoby M, Rutter N, Jonas T (2018). Three-dimensional thermal characterization of forest canopies using UAV photogrammetry. *Remote Sensing of Environment* 209:835–847. doi:10.1016/j.rse.2017.09.033.

Yoccoz NG, Nichols JD, Boulinier T (2001). Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* 16(8):446–453. doi:10.1016/S0169-5347(01)02205-4.

Simulación en GiD del problema de flujo de cavidad en 2D

GiD simulation of 2D cavity flow problem

Gabriela Pedraza Jiménez^{1*} , Miguel Ángel Rodríguez Velazquez² , Ricardo Román Gutiérrez¹ ,
Francisco Javier Domínguez Mota³ 

¹ Doctorado en Ingeniería Física. Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Mújica S/N Edificio B, planta baja, Ciudad Universitaria Morelia, Michoacán.

² Doctorado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria Morelia, Michoacán.

³ Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria Morelia, Michoacán.

Historial

Manuscrito recibido: 7 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 11 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre de 2024

*Autor para correspondencia

Gabriela Pedraza Jiménez

e-mail: 2220157h@umich.mx

ORCID: 0009-0002-8118-0260

Resumen

En este trabajo se presenta la solución numérica al problema de flujo laminar bidimensional en una cavidad con la frontera superior móvil. Utilizando el software *GiD Simulation* se realiza el preprocesamiento y postprocesamiento de las simulaciones numéricas, el cual permite establecer la geometría del problema y analizar los resultados. Además, se emplea el software *Kratos Multiphysics* para el procesamiento del problema mediante elementos finitos. Los resultados demuestran la eficiencia de *GiD* como herramienta para resolver problemas de flujo y la integración con *Kratos Multiphysics* proporciona una solución confiable.

Palabras clave: Flujo en cavidades, solución numérica, *GiD Simulation*, *Kratos Multiphysics*.

Introducción

Los problemas de flujo en recintos cerrados, también denominados cavidades, con tapa móvil han sido de gran interés y ampliamente estudiados debido a la interacción fluido-estructura que se presenta. El flujo laminar incompresible en una cavidad rectangular, cuya pared superior se mueve con una velocidad constante es uno de los más analizados y ha servido con frecuencia como un problema modelo para probar y evaluar técnicas numéricas, de ahí que se han producido soluciones de referencia para el mismo.

Uno de los trabajos más interesantes fue presentado

Abstract

In this work, the numerical solution of the two-dimensional laminar flow problem in a cavity with a moving upper boundary is presented. Using *GiD Simulation* software, preprocessing and post-processing of the numerical simulations are carried out, allowing for the establishment of geometry and analysis of the results. Additionally, *Kratos Multiphysics* software is employed for processing the problem using finite elements. The results demonstrate *GiD*'s efficiency as a tool for solving flow problems, and the integration with *Kratos Multiphysics* provides a reliable solution.

Keywords: Cavity flow, numerical solution, *GiD Simulation*, *Kratos Multiphysics*.

por Kawaguti (1961), quien realizó un estudio de la dinámica de un fluido viscoso en una cavidad rectangular bidimensional, asumiendo que la misma está delimitada por tres paredes planas rígidas, en las cuales la velocidad del fluido es cero, y por una placa plana que se mueve a una velocidad constante (**Figura 1**). Kawaguti consideró tres casos de las relaciones entre las longitudes de los lados de la sección transversal rectangular: 2:1, 1:1, 1:2. El número de Reynolds del flujo varía entre 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128. Para estos casos, las ecuaciones de Navier-Stokes las resolvió utilizando la metodología de diferencias finitas (LeVeque, 2007). Los resultados

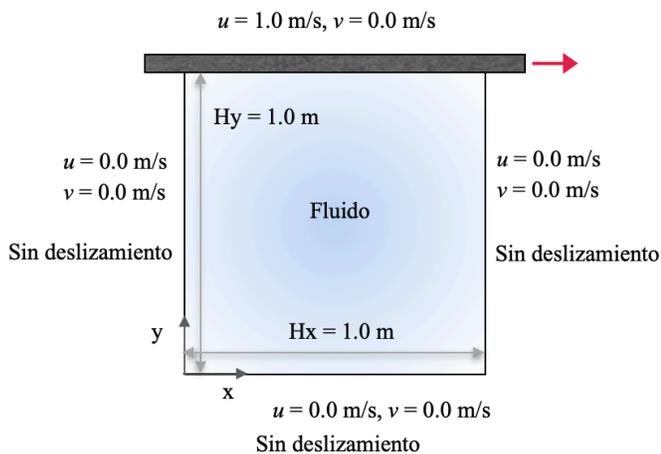


Figura 1. Modelo físico de un flujo en una cavidad con tapa móvil.

mostraron que existe un flujo circulante que se extiende a lo largo de la longitud de la cavidad y que la presión en la pared lateral izquierda es más alta que la presión en la pared derecha. Botella y Peyret (1998) presentaron el estudio del flujo en cavidades cuadradas con una frontera móvil considerando un número de Reynolds de 1000, obteniendo su solución mediante el método de proyección (Chorin, 1969), que mostró resultados altamente precisos ($\epsilon = 1 \times 10^{-8}$) para el flujo en cavidades. Bruneau y Saad (2006), llevaron a cabo simulaciones numéricas del flujo en la cavidad cuadrada con una tapa móvil considerando varios números de Reynolds. Los resultados utilizando la metodología de diferencias finitas fueron confiables comparados con aquellos presentados en la literatura de su momento. Marchi *et al.* (2009), resolvieron el problema de flujo en una cavidad cuadrada cuya tapa tiene una velocidad constante, mediante la metodología de volumen finito (Versteeg y Malalasekera, 2007), con aproximaciones de segundo orden de precisión llegando a resultados precisos, hasta alcanzar el error de redondeo de la máquina. Adicionales a estos, se han realizado estudios sobre la solución de problemas de flujo en cavidades cuadradas usando diferentes metodologías de solución.

Los estudios de flujo en cavidades con tapa móvil se han utilizado en el diseño de sistemas de refrigeración, procesos de fabricación con flujos controlados. Alruwaele y Gajjar (2024) demostraron que el uso de nanofluidos, como agua con nanopartículas de óxido de aluminio, mejora la transferencia de calor al aumentar la concentración de partículas y disminuir el número de Richardson, reduciendo las regiones de recirculación en las esquinas. Bhuiyan *et al.* (2017) simularon el flujo y

la transferencia de calor en una cavidad bidimensional con fuentes y sumideros discretos, encontrando que la transferencia de calor disminuye con la reducción del número de Darcy. Estos estudios muestran que investigar sobre el flujo en cavidades con tapa móvil aporta conocimientos clave para mejorar la eficiencia de sistemas térmicos.

Tomando en cuenta diversas referencias bibliográficas que abordan el problema de flujo laminar en cavidades con tapa móvil, se aprecian diferentes metodologías de solución, como diferencias finitas, métodos de proyección y volúmenes finitos, y logran obtener soluciones precisas para este problema modelo. En este trabajo, se llevó a cabo un análisis detallado del problema *benchmark* del flujo en cavidades bidimensionales, utilizando el software *GiD Simulation* para el preprocesamiento y postprocesamiento e integrado con *Kratos Multiphysics* para el procesamiento, con el objetivo de evaluar su eficiencia y confiabilidad en la solución de este tipo de problemas.

Metodología

El método de estudio se basa en resolver el problema de flujo laminar en una cavidad cuadrada cuya frontera superior tiene una velocidad constante. En esta sección, se plantea el problema presentando el modelo físico y matemático. Enseguida, se presenta la metodología de solución donde se muestran los software utilizados para la solución del problema así como la metodología que estos utilizan. Finalmente, se presenta la solución numérica al problema planteado.

Modelo físico

El dominio es una cavidad rectangular bidimensional de longitud unitaria por lado $H_x = H_y = 1.0 \text{ m}$. Esta cavidad está delimitada por tres paredes planas fijas, en las cuales la velocidad del flujo es cero, y una placa plana móvil en la frontera superior con una velocidad constante de 1 m/s en dirección del eje x . La **Figura 1** muestra el modelo físico del problema, donde u y v son las componentes del vector de velocidad en las direcciones x y y , respectivamente y p es la presión. Los parámetros del fluido se consideran tal que el número de Reynold (Re) es de 100, la densidad (ρ) es de 1.0 kg/m^3 y la viscosidad cinemática (ν) es de $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Modelo matemático

El modelo matemático del problema se define a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, siendo las dos más importantes la ecuación de conservación de masa y la

ecuación de conservación de momentum. Para establecer el modelo matemático se toma en cuenta las siguientes simplificaciones:

- El problema se examina en estado estacionario,
- Existe flujo laminar bidimensional en las direcciones x y y ,
- El fluido es incompresible,
- Propiedades constantes (ρ , μ),
- Disipación viscosa despreciable.
- De esta manera, el modelo matemático en forma conservativa resultante se expresa en las Ecuaciones (1), (2) y (3).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u^2}{\partial x} + \rho \frac{\partial uv}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial uv}{\partial x} + \rho \frac{\partial v^2}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (3)$$

Para resolver las ecuaciones gobernantes se especifican las condiciones de frontera, tendiendo condiciones de frontera tipo Dirichlet para las velocidades en todos los lados y de Neumann para la presión, como se expresa en las Ecuaciones (4), (5), (6) y (7).

$$\left. \begin{aligned} u = 0.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad x = 0 \\ u = 0.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad x = Hx \end{aligned} \right\} 0 \leq y \leq Hy, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u = 0.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad y = 0 \\ u = 1.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad y = Hy \end{aligned} \right\} 0 < x < Hx, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad x = Hx \end{aligned} \right\} 0 < y < Hy, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad y = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad y = Hy \end{aligned} \right\} 0 < x < Hx. \quad (7)$$

Método de solución

Para solucionar este problema se utiliza el software *GiD Simulation (GiD)* (Ribó *et al.*, 2022), acoplado con *Kratos Multiphysics (Kratos)* (Dadvand *et al.*, 2010; 2013; Mataix Ferrándiz *et al.*, 2022); ambos desarrollados por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). *Kratos* es un entorno de trabajo enfocado a la implementación de métodos numéricos para la resolución de problemas de ingeniería.

Así, las herramientas o procedimientos estándar como bases de datos, álgebra lineal o estructuras de búsqueda vienen como parte del núcleo de *Kratos* y están disponibles como bloques de construcción en el desarrollo de aplicaciones, las cuales se enfocan en la solución del problema de interés (Zorrilla, 2016); en este caso las ecuaciones de flujo, o ecuaciones de Navier-Stokes. Por su parte, *GiD* permite definir geometrías complejas, configurar condiciones de contorno, asignar propiedades al fluido, parámetros numéricos necesarios para resolver el problema y visualizar y procesar los resultados. El proceso de simulación con *Kratos* en *GiD Simulation* sigue una serie de pasos definidos.

Paso 1: Definición de la geometría.

En el software *GiD Simulation*, se inicia definiendo la geometría del dominio del problema, que en este caso corresponde a un cuadrado con lados de longitud $Hx=Hy=1.0$ m. Mediante las opciones de *Geometry > Line*, se crea un cuadrado con su esquina inferior izquierda en el punto (0,0) sobre el plano xy . Luego, mediante *Geometry > NURBS surface*, se define la superficie correspondiente al cuadrado. Esta etapa permite establecer la forma y tamaño del dominio donde se resolverán las ecuaciones de flujo.

Paso 2: Asignación de condiciones de frontera y propiedades del fluido.

Utilizando la interfaz de *Kratos* acoplada como problema

tipo con *GiD*, se especifican las condiciones de frontera para el problema de flujo en la cavidad. En este caso, las fronteras, derecha, izquierda e inferior tienen velocidades nulas en ambas direcciones $u=0.0$ m/s y $v=0.0$ m/s. La frontera superior tiene una velocidad constante de $u=1.0$ m/s y $v=0.0$ m/s, siendo u y v las componentes de la velocidad en dirección x y y , respectivamente. Además, se asignan las propiedades físicas del fluido, la densidad de 1.0 kg/m³, viscosidad dinámica de 0.001 kg/ms, como se muestra en la **Figura 2**.

Paso 3: Configuración de los parámetros numéricos y metodología de solución.

Se establecen los parámetros numéricos necesarios para la simulación. Esto incluye el criterio de convergencia, tomando en cuenta que el error relativo en el cambio de la velocidad es de 1×10^{-3} , el error absoluto en el cambio de la velocidad es de 1×10^{-5} , el error relativo en el cambio de la presión es de 1×10^{-3} y el error absoluto en el cambio de la presión es de 1×10^{-5} . El número máximo de iteraciones se consideró de 500, el tipo de resolvidor lineal fue mediante LU disperso, con pasos de tiempo de 0.01 s alcanzando el estado estacionario en 10 s.

Paso 4: Generación del mallado.

Una vez configurados los aspectos anteriores, se procede a generar un mallado estructurado del dominio. *GiD Simulation* proporciona opciones para personalizar el tamaño y tipo de malla. La generación de la malla se realiza mediante *Mesh > Element type > Quadrilateral* y se selecciona el dominio a mallar. Seguido, se genera el mallado estructurado a través de *Mesh > Structure > Surfaces > Assign number of divisions to surface lines*, asignando así el número de divisiones por lado. La **Figura 3** muestra el mallado de 40×40 , siendo un mallado estructurado conformado por cuadriláteros.

Paso 5: Ejecución de la simulación y visualización de resultados.

Finalmente, se ejecuta la simulación haciendo clic en el botón de inicio (o *Calculate > Calculate*). *Kratos Multiphysics* resuelve las ecuaciones de flujo en la cavidad y genera los resultados numéricos. Los resultados se pueden visualizar y analizar utilizando las herramientas de postprocesamiento de *GiD Simulation*, como gráficos y contornos.

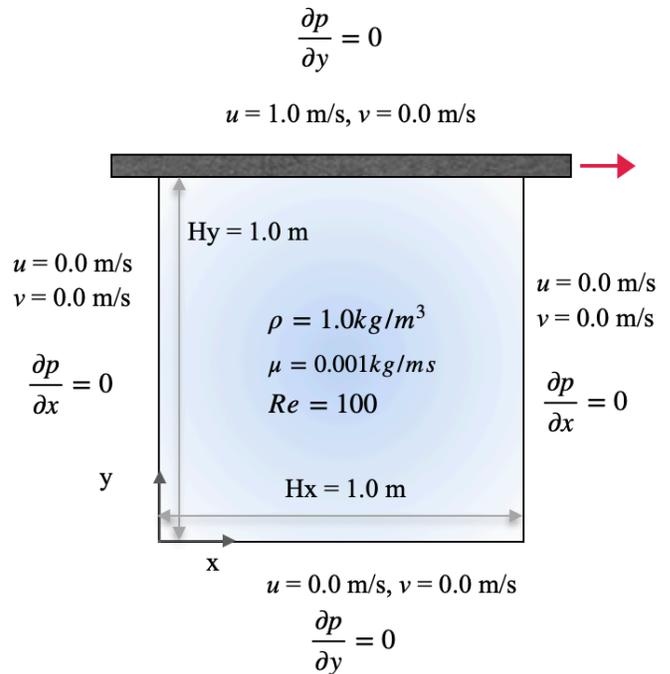


Figura 2. Modelo con condiciones de frontera y propiedades del fluido.

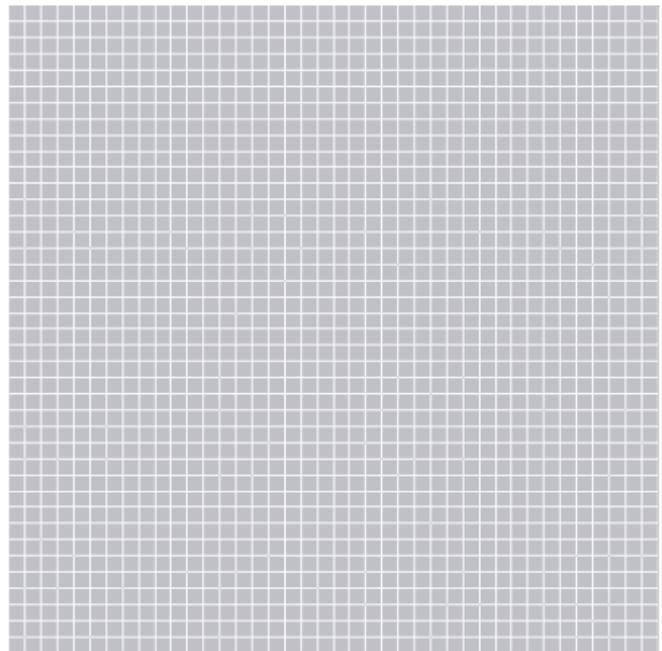


Figura 3. Mallado estructurado de 40×40 .

Resultados y discusión

La calidad de la malla juega un papel importante en la estabilidad y exactitud de cálculos numéricos. Algunas de las propiedades asociadas a la malla es la densidad, relación de aspecto, distribución de nodos, entre otros.

Para este análisis se realiza el estudio de independencia de malla considerando que el mallado es el adecuado cuando se tiene una diferencia porcentual de la suma de velocidades u en $x=0.5$ m menor del 0.3%, como se muestra en la **Tabla 1**. Se utiliza un mallado estructurado con cuadriláteros evaluando mallas de 20x20, 30x30, 40x40.

El análisis de independencia de malla resulta fundamental para determinar el tamaño óptimo del mallado. Después de analizar cualitativamente los resultados obtenidos para los diferentes mallados, se observó que, a partir de la malla de 40x40, los valores obtenidos en los resultados ya no variaban, con errores menores a la tolerancia, en comparación con los obtenidos con mallas más refinadas, como se observa en la **Figura 4**. Esto indica que utilizar una malla más fina no aportaría un aumento significativo en la precisión de los resultados y solo agregaría una mayor carga de tiempo computacional al análisis. Por lo tanto, se toma como base la malla de 40x40 para el análisis de resultados, asegurando así un equilibrio adecuado entre precisión y eficiencia computacional.

Al comparar los perfiles de velocidad obtenidos por la simulación con los datos presentados en la literatura, se observó una notable similitud en los perfiles de velocidad de u en $x=0.5$ m y de v en $y=0.5$ m, como se observa en la **Figura 5**.

Lo anterior sugiere que el uso del software *GiD Simulation* acoplado con *Kratos* ha sido capaz de capturar con precisión los patrones de flujo característicos de esta cavidad cuadrada bajo las condiciones de frontera específicas. Estos resultados validan la efectividad del enfoque de simulación implementado y brindan confianza en la interpretación de los datos. Además, se examinaron detalladamente otros aspectos del flujo, como la formación de vórtices. Se observó una clara formación de vórtices cerca de la tapa superior móvil, lo que concuerda con los resultados de la literatura (**Figuras 6 y 7**). Otro aspecto relevante es la visualización de líneas de corriente, que permitió comprender mejor la

estructura general del flujo en la cavidad. Las líneas de corriente revelaron patrones de recirculación y flujos de aceleración alrededor de los bordes y esquinas, lo cual es

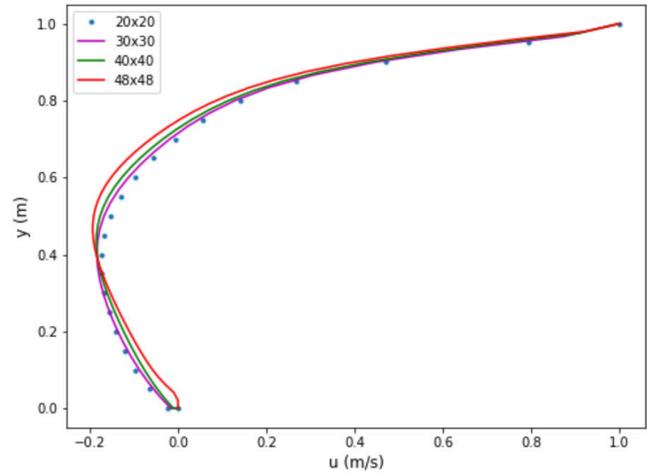


Figura 4. Perfil de velocidades u en $x=0.5$ m para diferentes mallados.

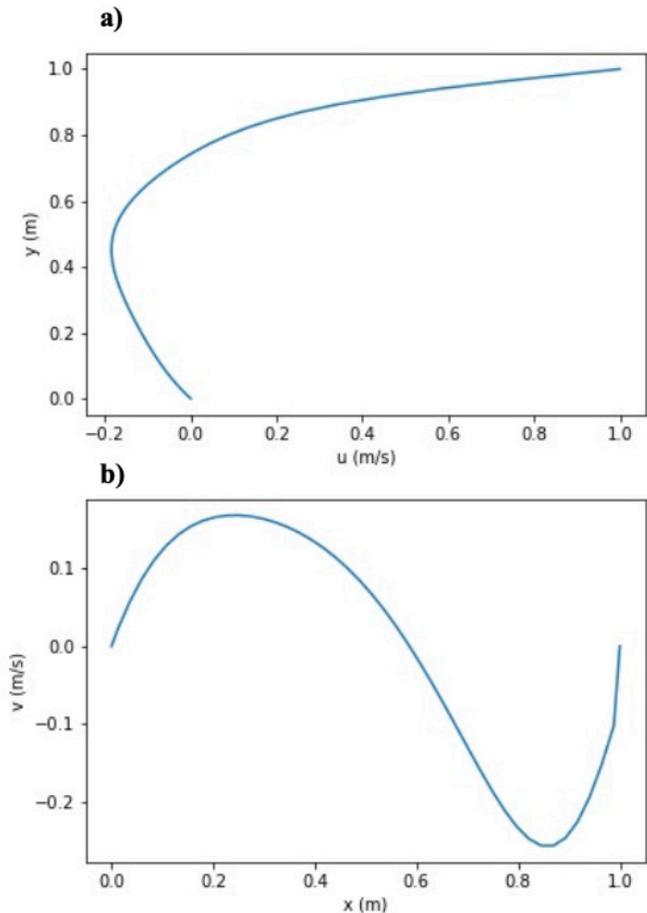


Figura 5. Perfil de velocidad a) u en $x=0.5$ m y b) v en $y=0.5$ m.

Tabla 1. Análisis de independencia de malla.

Malla	Velocidad u (m/s)	Diferencia porcentual
20x20	1.001639	
30x30	1.001674	0.003494
40x40	1.001414	0.025956

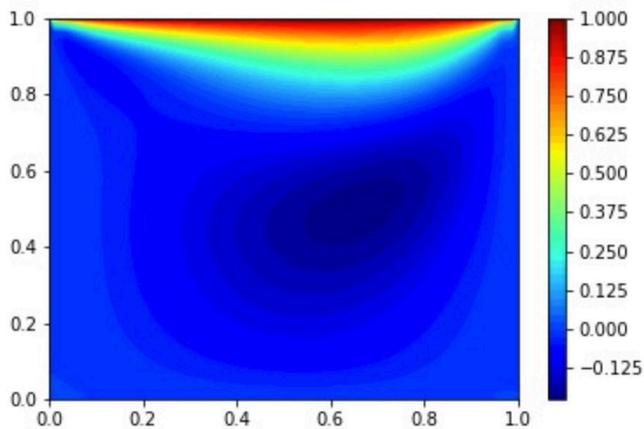


Figura 6. Contorno de velocidades u .

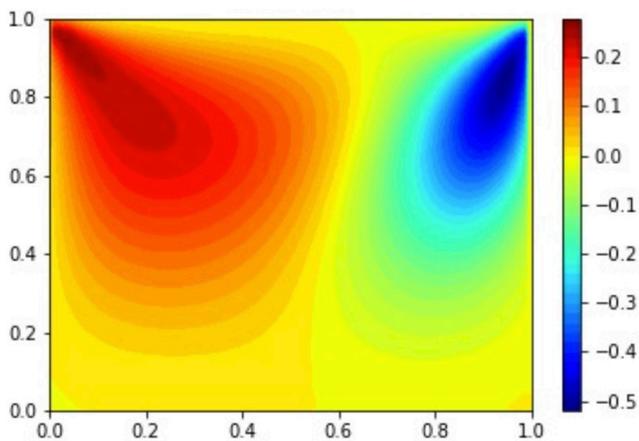


Figura 7. Contorno de velocidades v .

consistente con el comportamiento típico de este tipo de flujo confinado en cavidades.

En cuanto a la eficiencia computacional, el uso de un mallado de 40×40 demostró ser una buena elección, ya que proporcionó resultados precisos y se ejecutó en un tiempo razonable. Se realizaron pruebas con mallados más finos, pero la ganancia en precisión fue insignificante en comparación con el aumento significativo en tiempo de cálculo.

En resumen, la evaluación del flujo en la cavidad cuadrada con tapa superior móvil a velocidad constante arrojó resultados altamente satisfactorios. La elección de un mallado de 40×40 resultó ser adecuada, permitiendo obtener resultados confiables y eficientes. La similitud encontrada entre los perfiles de velocidad obtenidos y los presentados en la literatura respalda la precisión del modelo numérico utilizado. Estos resultados proporcionan una base sólida para el análisis y la

interpretación futura del flujo en condiciones similares.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado la eficiencia y confiabilidad del software *GiD Simulation* en la resolución del problema de flujo laminar bidimensional en una cavidad. La utilización de *GiD* para el preprocesamiento y postprocesamiento de las simulaciones numéricas permitió establecer la geometría del problema de manera precisa y sencilla. Además, la integración de *GiD* con el software *Kratos Multiphysics* para el procesamiento mediante elementos finitos brindó una solución robusta y precisa para el análisis del flujo en la cavidad. Algunas de las ventajas que se tienen al usar este software son:

- Cuenta con una interfaz gráfica fácil e intuitiva de usar que facilita la creación de modelos y la visualización de resultados.
- Ofrece diversos métodos de solución numéricos para el análisis de fluidos.
- Fácil visualización de resultados gracias al esquema de postprocesamiento.
- Además de análisis de fluidos, *GiD Simulation* puede resolver problemas de una variedad de disciplinas de simulación, como análisis estructural, transferencia de calor, entre otras.

Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con los datos presentados en la literatura, lo que valida la precisión del enfoque utilizado. Esta combinación de herramientas proporciona una solución eficiente, confiable y precisa para el estudio de fenómenos de flujo en diversas aplicaciones de ciencias e ingeniería.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por su apoyo invaluable a través de la beca de posgrado que nos ha sido otorgada. Esta beca ha sido una parte fundamental en nuestros estudios de posgrado, brindándonos la oportunidad de continuar con nuestra formación académica y avanzar en nuestra carrera profesional. Asimismo, agradecemos el apoyo y financiamiento de CIMNE a través de la red de Aulas CIMNE y otorgarnos la licencia profesional del software *GiD Simulation*. Esta licencia nos permitió acceder a

todas las características y funcionalidades avanzadas que ofrece, lo que impulsó las capacidades de modelado y simulación.

Referencias

- Alruwaele WHR, Gajjar JSB (2024). Lid-driven cavity flow containing a nanofluid. *Dynamics* 4:671-697.
- Bhuiyan AH, Alam MS, Alim MA (2017). Numerical simulation of heat transfer and fluid flow with lid-driven square cavity and discrete source-sink pairs. *AIP Conference Proceedings* 1851(1):020044.
- Botella O, Peyret R (1998). Benchmark spectral results on the lid-driven cavity flow. *Computers & Fluids* 27(4):421-433.
- Bruneau C, Saad M (2006). The 2D lid-driven cavity problem revisited. *Computers & Fluids* 35:326-348.
- Chorin AJ (1969). On the convergence of discrete approximations to the Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation* 23:341-353.
- Coll A, Ribó R, Pasenau M, Escolano E, Perez JS, Melendo A, Monros A, Gárate J (2020). “GiD v.14 Reference Manual [pdf]”, www.gidsimulation.com [consultado el 25 de mayo de 2020].
- Dadvand P, Rossi R, Oñate E (2010). An object-oriented environment for developing finite element codes for multi-disciplinary applications. *Arch. Computat. Methods Eng.* 17:253-297.
- Dadvand P, Rossi R, Gil M, Martorell X, Cotela J, Juanpere E, Idelsohn S, Oñate E (2013). Migration of a generic multi-physics framework to HPC environments. *Computers & Fluids* 80:301-309.
- Kawaguti M (1961). Numerical solution of the Navier-Stokes equations for the flow in a two-dimensional cavity. *Journal of the Physical Society* 16, 2301-2315.
- LeVeque R (2007). Finite difference methods for ordinary and partial differential equations: steady-state and time-dependent problems. Society for Industrial & Applied Mathematics.
- Marchi C, Roberta S, Araki L (2009). The lid-driven square cavity flow: Numerical solution with a 1024 x 1024 Grid. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 31(3):186-198.
- Ribó R, Pasenau M, Escolano E, Coll A, Melendo A, Monros A, Gárate J, Peyrau M (2022). GiD reference manual. Technical 474 report, CIMNE, Barcelona, España.
- Mataix Ferrándiz V, Bucher P, Zorrilla R *et al.* (2022). Kratos Multiphysics/Kratos: Release 9.2 (v9.2). Zenodo.
- Versteeg HK, Malalasekera W (2007). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Prentice-Hall.
- Zorrilla Martínez R (2016). FSI procedures for civil engineering applications. Universitat Politècnica de Catalunya: Tesis de Maestría.



Evaluación de la remoción de nitrógeno total en humedales con *Typha domingensis* y grava compacta

Evaluation of total nitrogen removal in wetlands with *Typha domingensis* and compact gravel

Alondra Camargo Almaraz, Roberto García Acevedo*, Jesús Alberto Rodríguez Castro, Ricardo Ruíz Chávez, Ezequiel García Rodríguez, Juan Pablo Molina Aguilar, Hugo Luis Chávez García

Facultad de Ingeniería Civil, Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Mújica S/N Morelia, Michoacán, México.

Historial

Manuscrito recibido: 14 de mayo de 2024
Manuscrito aceptado: 25 de octubre de 2024
Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Roberto García Acevedo
e-mail: roberto.garcia@umich.mx

Resumen

Los humedales artificiales son relevantes para el tratamiento de aguas residuales siendo eficaces en la remoción de nutrientes como el nitrógeno mediante la actividad de bacterias, protozoarios y hongos. En esta investigación se utilizó un humedal de flujo subsuperficial horizontal experimental ubicado en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), construido con grava compacta y utilizando como vegetación *Typha domingensis*, el cual recibe aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC). Se observó que las plantas remueven en la etapa inicial un 77.28% del nitrógeno total, en la etapa intermedia un 69.78% y en la etapa adulta un 77.37%, indicando una capacidad efectiva para la remoción de este contaminante orgánico, lo que permite concluir que es viable la implementación de este sistema en el tratamiento de las aguas residuales.

Palabras clave: Humedal artificial, agua residual, nitrógeno total, planta macrófita, límites permisibles.

Introducción

Los principales factores de la contaminación del suelo y agua, además de fuentes naturales como los eventos meteorológicos, sísmicos, erupciones volcánicas, son de origen antropocéntrico, incluyendo los relacionados con desarrollos habitacionales, las industrias, agricultura, ganadería, y minería (Delgadillo *et al.*, 2010). El crecimiento poblacional también es un factor importante para la contaminación del agua, y en las últimas décadas

Abstract

Artificial wetlands are relevant for wastewater treatment and are effective in removing nutrients such as nitrogen through the activity of bacteria, protozoa and fungi. In this research, an experimental horizontal subsurface flow wetland located at the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) was used, built with compact gravel and using *Typha domingensis* as vegetation, which receives wastewater from the Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC). It was observed that the plants remove 77.28% of the total nitrogen in the initial stage, 69.78% in the intermediate stage and 77.37% in the adult stage, indicating an effective capacity for the removal of this organic pollutant, which allows us to conclude that the implementation of this system in wastewater treatment is viable.

Keywords: Artificial wetland, residual water, total nitrogen, macrophyte plant, permissible limits.

se ha observado una gran dificultad para garantizar los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento (CONAGUA, 2015).

Las aguas residuales son consecuencia de las actividades humanas que se desarrollan todos los días. Estas aguas al ser vertidas en cuerpos de agua naturales y suelos, sin un previo tratamiento, pueden ocasionar graves daños al ambiente, a los ecosistemas acuáticos y a la salud pública, siendo un aspecto que se debe de resolver de

forma efectiva para disminuir la contaminación.

El tratamiento del agua residual se define como el conjunto de procesos que elimina la mayor cantidad de contaminantes, con el objetivo de alcanzar una calidad que cumpla con lo establecido en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

Existen tres tipos de procesos de tratamiento los cuales son físicos, químicos y biológicos. Dentro de los procesos biológicos se encuentran los humedales artificiales, que comúnmente se utilizan en localidades rurales (menores de 2500 habitantes) o poblaciones pequeñas, bastando con una persona para implementar un humedal a nivel doméstico, mientras que para el ámbito urbano pueden implementarse en ciudades de hasta 120 mil habitantes o incluso para mayores donde el límite está determinado por la disponibilidad del terreno (IMTA, 2022).

Para garantizar que los humedales artificiales representen una ventaja por su bajo costo de construcción, operación y mantenimiento se recomienda que sean construidos en poblaciones rurales, ya que, además en comparación con otros métodos convencionales que requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, los humedales suelen ser de menor costo (CONAGUA, 2015).

La construcción de un humedal se realiza de preferencia, en un área de terreno extensa que consiste en una membrana impermeabilizante, para evitar infiltraciones en el subsuelo (Delgadillo *et al.*, 2010), sobre la que se cultivan plantas en un medio de soporte (CONAGUA, 2015). Los humedales se utilizan para eliminar el nitrógeno total y otros contaminantes, cuya tasa de remoción está relacionada con el crecimiento de la planta (Lara, 1999).

Los humedales artificiales se clasifican en humedales de flujo superficial y humedales de flujo subsuperficial. En este caso se trabajó con un humedal experimental de flujo subsuperficial horizontal, utilizando grava compacta como medio de soporte y la especie vegetal *Typha domingensis*, ubicado en los terrenos de la planta de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), lo anterior con la finalidad de realizar una comparativa en las diferentes etapas de crecimiento.

Materiales y métodos

En el presente trabajo se utilizó un humedal experimental construido por tesis de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, ubicado a un costado del clarificador de la planta de tratamiento de aguas residuales del

Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Es un humedal experimental de flujo subsuperficial horizontal diseñado con la planta macrófita *Typha domingensis* y como material de soporte utiliza grava compacta. El humedal fue diseñado y construido con un largo de 2.10 m, un ancho de 0.70 m y una profundidad 0.70 m, ingresando un gasto de diseño de 58.79 l/d (Ferreya, 2020).

Para el diseño del humedal experimental se tomó en cuenta los criterios de diseño y remoción en humedales de flujo subsuperficial proponiendo un valor de tiempo de retención hidráulico de 7 días (Quezada, 2019).

Material de soporte

Se utilizó como medio de soporte grava triturada, debido a su facilidad de obtención en los bancos de la ciudad de Morelia. En cuanto a las características físicas del material, Ferreyra (2020) menciona un coeficiente de uniformidad de 1.51, una absorción baja del 1.65%, mientras que su densidad es de 2.65 g/cm³, así como una porosidad del 0.40. De igual forma establece que la grava es el medio de soporte más aplicado en humedales artificiales seguido de la arena, además de que realizó un análisis granulométrico para conocer la distribución del tamaño de las partículas obteniendo los siguientes diámetros: D₁₀: 13.30 mm, D₆₀: 20.08 mm y un coeficiente de uniformidad de 1.51.

Análisis de parámetros de campo

Se mantuvo el suministro del agua residual del tanque de abastecimiento de manera constante en el humedal con un gasto de diseño de 58.79 l/s como lo indicó Ferreyra (2020), para el mantenimiento de *Typha domingensis*. El análisis de nitrógeno total, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura de la muestra y del ambiente, sólidos disueltos totales y salinidad se realizó en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Se realizaron tres muestreos, en tres etapas de crecimiento de *Typha domingensis* y así mismo, se obtuvieron dos muestras en frascos estériles, en el influente y efluente del humedal con el propósito de obtener parámetros de campo y posteriormente realizar la determinación de nitrógeno total.

Determinación de nitrógeno total

Se utilizó el Método de HACH TNT 827, que se caracteriza por la digestión de persulfato alcalino, las muestras analizadas se ingresan a un termoreactor DRB200 a una temperatura de 120 °C por treinta minutos y posterior-

mente, se toman las lecturas con un espectrofotómetro DR5000.

Dicha determinación está basada en los Métodos Estándar para análisis del agua y aguas residuales, aprobados por la Agencia de protección Ambiental de los E.E.U.U. (EPA) sobre las propiedades y calidad del agua.

Resultados

En la **Tabla 1** se muestran los resultados de los tres muestreos obtenidos en las diferentes etapas de crecimiento de la planta en el efluente.

El primer muestreo se realizó en el mes de marzo cuando la planta se encontraba en su etapa inicial con una altura de 2.00 m, el segundo muestreo se realizó el 8 de mayo de 2023, la planta tenía una altura de 2.60 m y se encontraba en su etapa intermedia de crecimiento y el tercer muestreo se realizó el 5 de julio de 2023, la

planta tenía una altura de 3.55 m y se encontraba en su etapa adulta de crecimiento. En la **Tabla 2** se presentan los parámetros de campo obtenidos de cada muestreo durante el crecimiento de la planta *Typha domingensis*.

En la **Figura 1** se observa la remoción de nitrógeno total de los análisis del influente y efluente del humedal en los tres muestreos. Los porcentajes de remoción del nitrógeno total se presentan en la **Tabla 3**. En la **Figura 2** se observan el porcentaje de remoción del nitrógeno total en sus tres etapas de crecimiento de la *Typha domingensis*.

Discusión

Los resultados obtenidos del análisis de laboratorio se compararon con la norma oficial mexicana para descargas de aguas municipales (NOM-001-SEMARNAT-2021), con los límites permisibles para embalses, lagos y lagunas, debido a que estos son los más riguro-

Tabla 1. Resultados de nitrógeno total (mg/l).

Muestreo	Fecha	Etapa de crecimiento de <i>Typha domingensis</i>	Parámetro (mg/l)	Influente	Efluente	NOM-001-SEMARNAT-2021 (Límites permisibles)
					Humedal 2-grava compacta	
1	30-mar-23	Inicial	Nitrógeno total	103	23.40	30
2	08-may-23	Intermedia	Nitrógeno total	94.3	28.50	30
3	05-jul-23	Adulta	Nitrógeno total	118	26.70	30

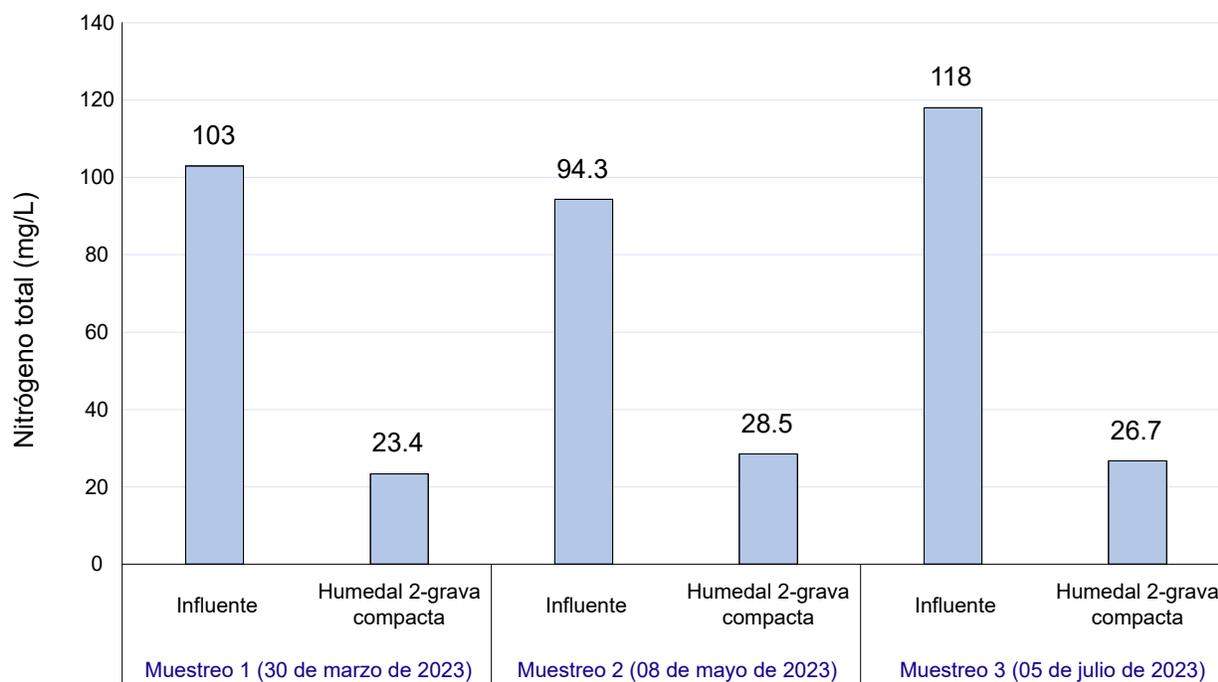


Figura 1. Remoción de nitrógeno total (mg/l).

Tabla 2. Parámetros de campo.

Parámetros de campo y análisis de laboratorio	Muestreo 1 (30 de marzo de 2023)		Muestreo 2 (8 de mayo de 2023)		Muestreo 3 (5 de julio de 2023)	
	Influente	Humedal 2-grava compacta	Influente	Humedal 2-grava compacta	Influente	Humedal 2-grava compacta
pH	7.80	7.20	7.20	6.30	8.30	7.20
Conductividad eléctrica (µs/cm)	1540	1210	1817	2.01	1865	4.35
Sólidos disueltos totales (mg/l)	766	597	909	1009	934	2.27
Salinidad (%)	0.80	0.60	0.90	1.0	0.90	2.30
Temperatura de la muestra (°C)	22	20	21.5	21	23	22
Temperatura del ambiente (°C)	24.6	24.60	21	21	27.50	27.50
Oxígeno disuelto (mg/l)	2.20	0.10	0.20	0.10	0.20	0.20
Nitrógeno total (mg/l)	103	23.40	94.30	28.50	118.00	26.70

Tabla 3. Porcentaje de remoción de nitrógeno total de los muestreos

Análisis de laboratorio	Muestreo 1 (30 de marzo de 2023)		Muestreo 2 (8 de mayo de 2023)		Muestreo 3 (5 de julio de 2023)	
	Influente	Humedal 2-grava compacta	Influente	Humedal 2-grava compacta	Influente	Humedal 2-grava compacta
Porcentaje de remoción de nitrógeno total (%)	100	77.28	100	69.78	100	77.37

En comparación con las otras opciones que presenta la norma. Cabe mencionar que se utilizó el valor instantáneo debido a que sólo se realizó un muestreo simple en cada una de las tres etapas de crecimiento de la *Typha domingensis*. Comparando los resultados con la norma mencionada anteriormente, se observó que los tres muestreos obtenidos en las diferentes etapas de crecimiento de la planta en el efluente cumplen con el límite

permisible de la norma.

Con relación a la remoción del nitrógeno total se observa que las plantas remueven en la etapa inicial un 77.28%, en la etapa intermedia un 69.78% y en la etapa adulta un 77.37%, indicando una capacidad efectiva para la remoción del nitrógeno total, lo que permite concluir que es viable su implementación en el tratamiento de las aguas residuales.

De acuerdo a los resultados, se concluye que se cumple con los límites permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Es importante mencionar que en México no se encuentra información específica de la remoción de nitrógeno total utilizando *Typha domingensis* y como medio de soporte la grava compacta, por lo que es necesario continuar investigando al respecto.

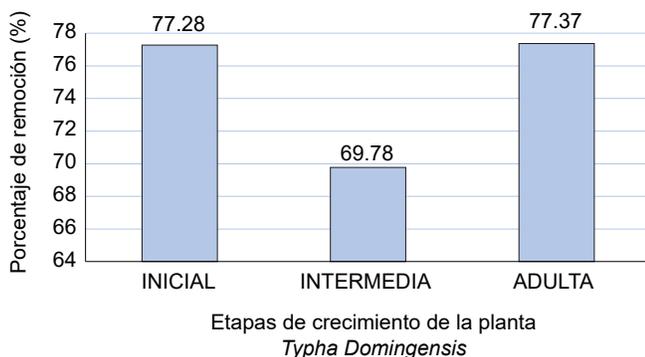


Figura 2. Porcentaje de remoción de nitrógeno total.

Referencias

A. Vera MN (2007). Estudio de la relación entre el crecimiento de la macrófita *Typha dominguensis* y la remoción de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en un humedal construido. *SciELO* 5.

- Aguilera JS, García AR, Ruíz CR (2009). *Manual de Prácticas Plantas de Tratamiento de Aguas*. Morelia, Michoacán: UMSNH.
- Carhuancho FM (2021). *Estudio de biomasa de distintas poblaciones de la especie Typha domingensis Pers. cultivadas en flotación*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Castro AB (2019). *Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas*. Honduras. Recuperado el 2024, de <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/67b581c2-1a93-4285-ac16-e95b40548146/content>
- Castroviejo S (2007). *Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares (Vol. XVIII)*. (M. L. S. Castroviejo (Madrid), Ed.) Madrid: Real Jardín Botánico, CSIC.
- CICEANA (2020). *Ciclo del Nitrógeno*. Obtenido de Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A. C. (CICEANA): <http://www.ciceana.org.mx>
- CONAGUA (2015). *Libro 25. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales (Vol. 25)*. México, D.F.: SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 2022
- CONAGUA (2015). *Libro 30. Diseño de PTARM: Humedales Artificiales (Vol. 30)*. México, D.F.: SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 2022, de CONAGUA.
- Delgadillo O, Camacho A, Pérez LF, Andrade M (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochamba, Bolivia.
- Ferreira JL (2020). *Medios de soporte alternativos para mejorar la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, en el estado de Michoacán*. Morelia. Recuperado el 2023, de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/4638/FIC-M-2020-0500.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- HACH (1933). *Prueba en cubeta TNTplus para fósforo (reactivo y total), LR (0,15 - 4,50 mg/L PO₄), 25 pruebas*. Obtenido de Hach LATAM : <https://latam.hach.com/prueba-en-cubeta-tntplus-para-fosforo-reactivo-y-total-lr-0-15-4-50-mg-l-po-25-pruebas/product?id=54617177265>
- HACH (1933). *Pruebas en cubeta TNTplus para nitrógeno (total), HR (5-40 mg/L N), 25 pruebas*. Obtenido de Hach LATAM: <https://latam.hach.com/pruebas-en-cubeta-tntplus-para-nitrogeno-total-hr-5-40-mg-l-n-25-pruebas/product-details?id=54617158883>
- Hernández Batis JO (2016). *Las formas múltiples del nitrógeno*. Obtenido de MICROLAB INDUSTRIAL.
- IMTA(2022). *¿Cómo construir un humedal para el tratamiento del agua residual en mi escuela?* México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Obtenido de <https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/ecoagua/ecoagua-humedal-tratamiento-del-agua-residual.pdf>
- Lara JA (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña-Instituto Catalán de Tecnología*. Barcelona.
- Pérez NE (2021). *Colmatación de medios de soporte en humedales artificiales de flujo sub-superficial que emplean Typha Domingensis*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Obtenido de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/6380
- Pichardo JM (13 de agosto de 2009). *CONABIO*. Obtenido de CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm>
- Quezada DV (2019). *Eficiencia de remoción de contaminantes en el agua, por medio de vegetación hidrófita disponible en el estado de Michoacán (Typha domingensis y Eleocharis densa)*. Recuperado el 2023, de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/4635/FIC-R-M-2019-1653.pdf?sequence=1&isAllowed=y



Determinación de la calidad de los tabicones no estructurales de la manufacturera Zoquite en Guanajuato Capital

Determination of the quality of the non-structural pumice bricks of the Zoquite manufacturing company in Guanajuato Capital

Luis Elías Chávez Valencia^{1*} , Francisco José Luna Rodríguez¹ , Elia Mercedes Alonso Guzmán² ,
Hugo Luis Chávez García² 

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Historial

Manuscrito recibido: 25 de julio de 2024

Manuscrito aceptado: 11 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Luis Elías Chávez Valencia

e-mail: lechavez@ugto.mx

ORCID: 0000-0003-0830-7747

Resumen

La empresa Zoquite es una manufacturera de vibrocomprimidos ubicada en la ciudad de Guanajuato, en cuyo taller se elaboraron tabicones ligeros con relaciones agua-cemento de 1.0 y 1.2 de forma casi artesanal, los cuales fueron curados en la cámara de fraguado de la Universidad de Guanajuato. Así mismo, muestras representativas de los insumos materiales se transportaron al laboratorio para su análisis, encontrando que cumplen con las especificaciones de la normativa, excepto que la pomacita presenta granos de mayor tamaño que 3/8" lo que confiere al tabicón una textura porosa que influyó en la forma de falla. En los tabicones ligeros caracterizados en conformidad con las normas NMX y ASTM se observó que el agua de mezclado tiene un efecto marcado en las absorciones y la contracción, ya que su racionamiento se realiza concibiendo la necesidad de agua para el acomodo por vibrocompresión y no tanto para hidratación del cemento Portland, condición que redundó en una resistencia a compresión simple que se presentó mermada para los primeros días del curado, pero que superó la especificación normativa de 3.43 MPa a los 28 días de edad, efecto que no es tan marcado en la bachada de mayor contenido de agua. Así pues, el control de calidad de los tabicones ligeros manufacturados por Zoquite, aun cuando son elaborados de forma empírica y casi artesanal cumplen con los requisitos establecidos en la normativa NMX C-441-2013.

Palabras clave: Calidad, prefabricados, manufactura, vibrocompresión, pomacita.

Abstract

The Zoquite company is a vibrocompressed manufacturer located in the city of Guanajuato, in whose workshop pumice bricks with water-cement ratio of 1.0 and 1.2 were produced in a quasi-artisanal manner, which were cured in the curing chamber of University of Guanajuato. Likewise, representative samples of the raw materials were transported to the laboratory for analysis, finding that they complied with the specifications of the standards, except that the pumice has grains higher than 3/8", which generated a porous texture in the brick that had influence in the failure path. In the pumice bricks that were characterized in accordance with the NMX and the ASTM standards, it was observed that the mixing water has a marked effect on the absorptions and contraction since its rationing is carried out considering the need of water for the accommodation by vibrocompression and not so much for hydration of Portland cement, a condition that resulted in a simple compression resistance that was reduced for the first days of curing, but at 28 days of curing it was higher than the standard limit of 3.43 MPa, an effect that is not as marked in the batch with the highest water content. Thus, the quality control of the pumice bricks manufactured by Zoquite, even when they are produced empirically and almost by hand, got the requirements established in the standards.

Keywords: Quality, bricks, manufacturing, vibrocompression, pumice.

Introducción

El tabicón es un elemento prefabricado en forma de prisma cuadrangular sólido elaborado de una mezcla de agregados finos y gruesos, y en algunos casos con aditivos que son homogenizados, amasados y vibrocomprimidos en talleres casi artesanales. En el corredor industrial Irapuato-Guanajuato-Silao-León, el tabicón es preferido por sobre el tabique no solo porque genera mayores volúmenes de obra debido a su rendimiento por metro cuadrado, sino también por el impulso de los gobiernos municipales que en coalición con los estatales están promocionando el uso de vibrocomprimidos como una forma indirecta de disminuir la contaminación que consideran, generan las ladrilleras. Así pues, los tabicónes son importantes en la edificación de viviendas, y el mercado ha dado pauta para el desarrollo de piezas en distintos tamaños, colores y materiales, así mismo, diversos factores del entorno de la industria de la construcción han limitado la promoción de un proceso industrial que redunde en una mejor calidad de producto, por lo que el tabicón sigue siendo producido en talleres, tal como el de Zoquite (Chávez Valencia, 2023), pues es la forma que dicha actividad económica sigue siendo rentable.

La calidad como elemento integral de la competitividad empresarial (Luna-Altamirano *et al.*, 2021) está constituida por el producto, el proceso y la atención al cliente, esta investigación se centró en la calidad del producto, en el entendido que las otras dos calidades están relacionadas y son trascendentales, pero por el alcance de este estudio se acotó solo al tabicón ligero empleado sin fines estructurales; para lo cual se analizaron las propiedades de las materias primas y del tabicón resultante con base a las normas mexicanas sin carácter de obligatoriedad, denominadas NMX, y a las American Standard for Testing and Materials (ASTM). Así pues, siendo el tabicón ligero ampliamente usado en la industria de la construcción en Guanajuato capital por su rendimiento y facilidad de transporte, pero con una alta dependencia de la obra de mano, la determinación de la calidad de dicho producto prefabricado es trascendental y se presenta a continuación.

Metodología

Las materias primas empleadas para la elaboración son la pumicita, o vidrio volcánico, roca ígnea extrusiva, también se llama espuma volcánica, y en Guanajuato se le suele llamar pomacita y el cemento Portland hidráulico. Para la caracterización del agregado

pétreo se determinaron sus propiedades físicas: granulometría, peso volumétrico, peso específico y porcentaje de absorción, y la humedad actual; para el cemento hidráulico se determinó: gravedad específica, consistencia normal y tiempo de fraguado. Después se elaboraron los tabicónes en el taller de Zoquite con dos relaciones agua-cemento (A/C) de 1.0 y 1.2; una vez transcurrido el periodo de curado, se cuantificó la calidad del producto de conformidad a las NMX y ASTM para 7, 14 y 28 días de edad de curado.

Agregado pétreo

La granulometría se evaluó a través del método ASTM C136/C136M -19 (ASTM, 2019) donde se pasó una muestra representativa de pomacita por los tamices establecidos en la norma, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas, posteriormente fue graficado y analizado con respecto a las especificaciones para concreto hidráulico ligero de la norma C330/C330M-23 (ASTM, 2023) debido a que los tabicónes pueden idealizarse como material compuesto con matriz cementicia que aglomera agregado ligero. Para la masa volumétrica seco-suelto (MVSS), y masa volumétrica seca-varillada (MVSV) se empleó la norma ASTM C29/C29M-23 (ASTM, 2023) que permite determinar el peso por unidad de volumen cuando la pomacita se encuentra en estado natural seco-suelto, y seco-varillado, respectivamente. Para la absorción y peso específico del agregado pétreo fino se empleó la norma ASTM C128-22 (ASTM, 2022) y para la pomacita gruesa se empleó la ASTM C127-15 (ASTM, 2015), que permitió la evaluación de la relación entre la masa de la pomacita y la masa de un volumen de agua igual al volumen de las partículas del agregado pétreo, además, la prueba se realiza cuando el agregado se encuentra en una condición de superficie saturada y seca, momento en que se determinó la absorción. Finalmente, la humedad actual se evaluó mediante la norma ASTM C566-19 (ASTM, 2019) que permite determinar el contenido de humedad de la pomacita al momento que es empleada en la preparación de la mezcla y permite realizar los ajustes necesarios en el agua de amasado.

Cemento portland

La gravedad específica del cemento hidráulico se determinó con el frasco de Le Chatelier según la ASTM C188-17 (ASTM, 2023) que es el peso del cemento por unidad de volumen sin considerar los vacíos del cemento. La consistencia normal del cemento hidráulico

se evaluó con ASTM C187-23 (ASTM, 2023) que es la cantidad de agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato de Vicat penetre $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ a la pasta de cemento, durante 30 segundos. Para el tiempo de fraguado se empleó la norma ASTM C191-21 (ASTM, 2021) por el método de la aguja de Vicat.

Elaboración y curado

Los niveles de dosificación se establecieron con una visita a las instalaciones del taller (bloquera) de Zoquite, observando que la relación AC de 1.2 producía piezas con matriz cementicia segregada con respecto a los agregados pétreos por un aparente exceso de agua, por lo que se decidió conocer las propiedades de los tabicones resultantes de la relación A/C= 1.0. La dosis de materiales empleada por la empresa Zoquite es empírica, pero la ha afinado conforme a la experiencia en la elaboración de tabicones ligeros por más de una década, dicha proporción para producir 50 piezas está formada por 26 paladas de pomacita gruesa (140 litros), 4 paladas de pomacita fina (20 litros), 25 litros de CPC 30R para 30 y 25 litros de agua que resultan en A/C de 1.2 y 1.0, respectivamente. Para la elaboración de los tabicones, la mitad del total de la dosis de materiales fue colocada paulatinamente en una mezcladora de paletas y agitada por 5 minutos, después se colocó lentamente la otra mitad para ser agitada por otros 5 minutos más.

Una vez que el material fue homogenizado, fue vaciado al pie de la vibrocompresora para que los tabicones fueran manufacturados como sigue: 1. Se colocó una tarima de madera bajo el molde hembra (10 huecos) y estos dos sobre la mesa vibratoria, verificando que tanto la tarima como el molde estuvieran fijos en las muescas; 2. Se llenaron los moldes en tres capas ayudando con la mano para el acomodo del material, además, en cada una de las capas se dio un preacomodo con una vibración ligera (1 a 2 segundos), y al finalizar el llenado se procuró dejar el molde colmado; 3. Se colocó el apisonador (molde macho) sobre el molde hembra, y se vibrocompactó el material durante 5 a 10 segundos; 4. Se levantó

el apisonador para despegar el molde hembra, quedando los tabicones depositados en la tarima de madera; y 5. Se retiró la tarima de madera con los tabicones y se llevó al sitio de curado.

El método de curado convencional consiste en cubrir los tabicones con una frazada de hule durante un periodo de 24 horas continuas, para posteriormente retirar la cubierta y dejarlos a la intemperie hasta ser comercializados, no obstante, este método puede tener un impacto negativo sobre las propiedades de los tabicones, por lo que para esta investigación, las muestras fueron llevadas el cuarto de curado en las instalaciones de la Universidad de Guanajuato con un 90% de humedad relativa y $21 \text{ }^\circ\text{C}$ de forma constante.

La calidad de los tabicones se determinó con base a las especificaciones de las normas NMX-C-441-2013 para tabicones de uso no estructural para 7, 14 y 28 días de curado, para lo cual, las dimensiones y el peso volumétrico de los tabicones se evaluaron conforme a NMX-C-038-2013, la contracción con NMX-C-024-2012, el acabado con NMX-C-441-2013, la humedad actual se determinó como el agua contenida en el tabicón después de ser sacado del curado y permanecer 24 horas a la intemperie y a partir de esa condición se evaluó la absorción y absorción inicial con NMX-C-037-2013, la resistencia compresión simple con NMX-C-036-2013, y también se evaluó la resistencia a flexión con la ASTM C293/C293M-16 (ASTM, 2016) esta propiedad solo es imprescindible en los tabicones para uso estructural.

Resultados y discusión

Insumos materiales. Pomacita

La pomacita es el geomaterial natural, un producto ígneo extrusivo o una espuma volcánica, que la empresa Zoquite trae desde el municipio de Ezequiel Montes en Querétaro; dicho material presenta dos tipos de textura y estructura, una de ellas más fina que la otra, por lo que se denominaron pomacita gruesa (G) y

Tabla 1. Propiedades básicas de la pomacita.

Pomacita	MVSS (kg/m^3)	MVSV (kg/m^3)	Masa volumétrica (kg/m^3)	Humedad actual (%)	Peso específico (kg/m^3)	Absorción (%)
Gruesa	691.35	765.07	751.34	11.75	1200	26.30
Fina	1141.3	1245.5	751.34	6.74	1810	36.36

fina (F), respectivamente. En la **Tabla 1**, se muestran los resultados de la caracterización de las propiedades de la pomacita. Además, se determinó el valor de la masa volumétrica del agregado pétreo de una muestra representativa en la bachada empírica tradicionalmente empleada por Zoquite que consisten en 26 paladas de pomacita gruesa y 4 paladas de la fina. De la **Tabla 1** se puede observar que la masa volumétrica es 751.34 kg/m³, menor de 1050 kg/m³ que es el límite superior en las especificaciones de NMX C-299-2010 para ser considerado material pétreo ligero; así mismo, el peso específico y la humedad de absorción de la pomacita fina es mayor que la pomacita gruesa. La abundancia de material fino incrementa la demanda de lechada por el área superficial, incrementando la masa volumétrica, la proporción estudiada es G/F= 6.5 en peso/masa.

En la **Tabla 2** se muestra la granulometría de la pomacita gruesa y de la fina, así mismo se ilustra la granulometría de los límites de la ASTM C330/C330M-23 que son los tamaños recomendados para concreto hidráulico ligero, lo anterior debido a que la morfología del agregado pétreo tiene alta influencia sobre las propiedades de los materiales con matriz cementicia (León, 2010), y al no existir especificaciones normadas al respecto, se empleó la relativa a concreto hidráulico ligero. Así mismo, en la **Tabla 2** se observa la granulometría de pomacita empleada en la bachada sin cribar y cribada por la malla 3/8” que es el valor máximo

en las especificaciones de la ASTM C330/C330M-23. Los resultados de la distribución granulométrica y de los límites se ilustran en el **Figura 1**.

De la **Figura 1** se puede observar que la distribución granulométrica de las pomacita fina y gruesa no están dentro de los límites recomendados en la especificación ASTM C330/C330M-23, respectivamente, lo que indica que los tamaños son tendientes a la zona de finos y de gruesos, que es coincidente con la primera observación de la morfología del insumo pétreo. Además, al realizar la determinación de la distribución de granos de la bachada empírica que tradicionalmente ha sido empleada por Zoquite (bachada sin cribar) se observa en la gráfica que dicho material se encuentra dentro de los límites de la especificación ASTM C330/C330M-23, pero tiene presencia de tamaños mayores a 3/8” lo que podría tener consecuencia sobre la textura del tabicón ligero.

Finalmente, para determinar la distribución de la bachada con tamaño máximo de 3/8”, esta se cribó y se puede identificar en la **Figura 1**, donde se observa que la mitad de su curva granulométrica presenta la presencia excesiva de material fino, lo que podría ser negativa en la calidad del tabicón ligero. Así, del análisis granulométrico se tiene dos tipos de insumo pétreo, el primero donde el material se cribó se tiene mayor contenido de material fino lo que redundaría en una mayor área superficial que requiere mayor contenido de cemento para tener

Tabla 2. Granulometría de la pomacita gruesa y fina.

Malla	Abertura	% que pasa Gruesa	% que pasa Fina	% que pasa bachada sin cribar	% que pasa bachada cribada	Límite inferior	Límite superior
1»	25.4	98.95	99.69	99.04	100.00		
3/4»	19.1	97.05	99.69	97.40	100.00		
1/2»	12.7	92.69	96.12	93.14	100.00	100.00	100.00
3/8»	9.52	87.04	92.28	87.74	98.82	90.00	100.00
1/4»	6.35	73.96	85.31	75.47	95.09		
No. 4	4.76	65.75	80.51	67.71	90.74	65.00	90.00
No. 8	2.36	31.40	60.51	35.28	73.62	35.00	65.00
No. 16	1.18	16.91	48.71	21.14	53.48		
No. 30	0.60	7.36	33.76	10.87	36.06	10.00	25.00
No. 50	0.255	3.02	23.09	5.69	21.78	5.00	15.00
No.100	0.15	1.13	11.67	2.53	16.44		
No.200	0.075	0.19	1.86	0.41	9.44		
Charola	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

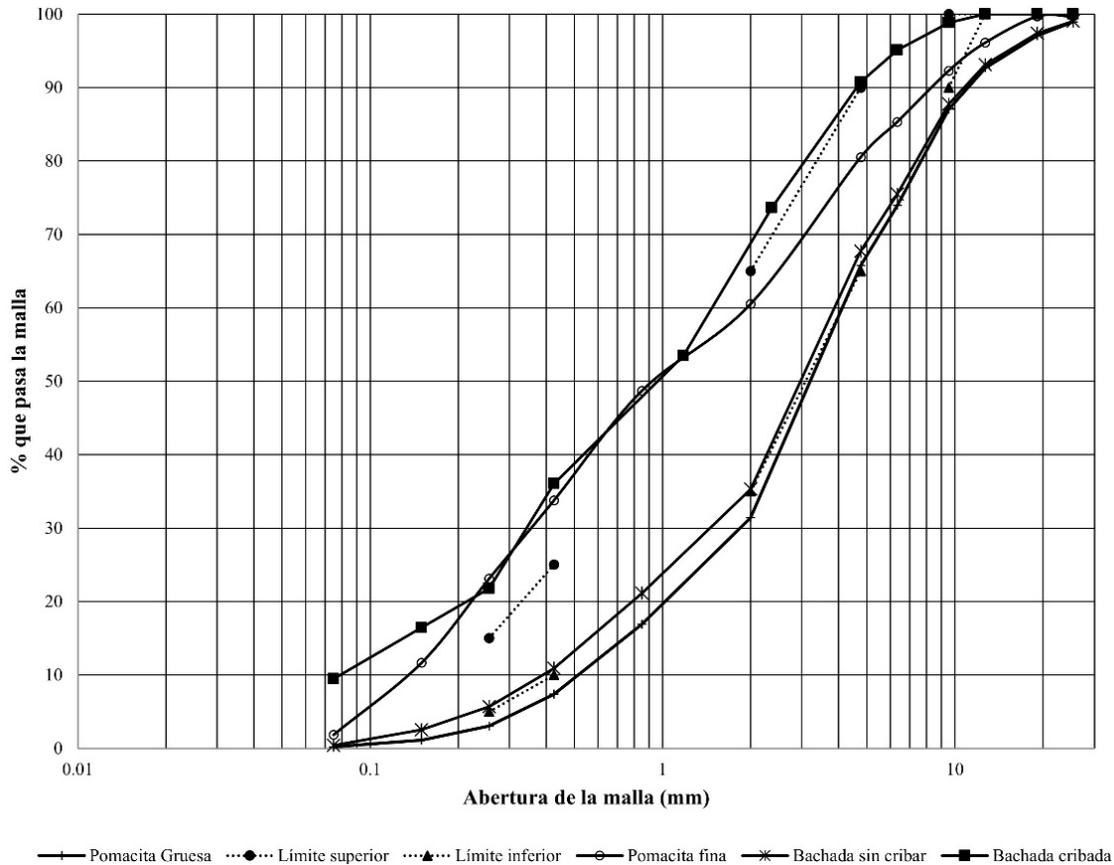


Figura 1. Distribución granulométrica de la pomacita y los límites de ASTM C-330/C330M-23

una pasta rica que aglomere a los granos finos; en contraste cuando la pomacita no es cribada presenta tamaños mayores al máximo por lo que requiere menor contenido de cemento, pero la presencia de esos tamaños granulométricos modifica su



Figura 2. Textura del tabicón ligero empleando la dosis y granulometría tradicional.

compacidad relativa y otorga una textura granular al producto final (Figura 2), que incide sobre la forma de la fractura que en general fue por aplastamiento y no por cortante como se esperaría en esos elementos prismáticos.

Los resultados previos de la elaboración de estas piezas condujeron a la decisión de adicionar la pomacita sin cribar en la proporción empírica empleada por Zoquite que consiste en 26 paladas de pomacita gruesa, 4 paladas de pomacita fina, 25 litros de cemento CPC 30R y 30 litros de agua ($A/C = 1.2$) dando un rendimiento de 50 piezas de tabicón ligero no estructural de dimensiones nominales de 7x14x28 centímetros. Así mismo, se

Tabla 3. Propiedades del CPC 30R empleado por Zoquite.

Propiedad	Resultado	Límite inferior	Límite superior
Gravedad	3.15 g/cm ³	3.1 g/cm ³	3.2 g/cm ³
Consistencia normal	29.5%	23%	33%
Fraguado inicial	75 minutos	45 minutos	-----
Fraguado final	780 minutos	600 minutos	-----

elaboraron otras 50 piezas constituidas por 26 paladas de pomacita gruesa, 4 paladas de pomacita fina, 25 litros de cemento CPC 30R y 25 litros de agua ($A/C = 1.0$).

Insumos materiales. Cemento portland

Las propiedades del cemento portland (CPC 30R) empleado por la empresa Zoquite se muestran en la

Tabla 3, se observa que cumple con las especificaciones en concordancia con la NMX C-414-2017, por lo que se continuó con su uso en la producción de los tabicones ligeros.

Propiedades físicas y mecánicas de los tabicones

La cantidad de tabicones ligeros resultantes por la

Tabla 4. Dimensiones y contracción de los tabicones para 7, 14, 28 días para $A/C = 1.2$.

	Largo	Ancho	Alto	Norma
7 días				
Dimensiones (cm)	28.03	13.97	8.98	NMX C-038-2013
Límite máximo (cm)	30	10 a 30	15	
Contracción (%)	0.49	0.59	0.56	NMX C-024-2012
Límites (%)	<0.065	<0.065	<0.065	
14 días				
Dimensiones (cm)	27.98	14.30	9.00	NMX C-038-2013
Límite máximo (cm)	30	10 a 30	15	
Contracción (%)	0.38	0.32	0.35	NMX C-024-2012
Límites (%)	<0.065	<0.065	<0.065	
28 días				
Dimensiones (cm)	28.10	14.09	9.07	NMX C-038-2013
Límite máximo (cm)	30	10 a 30	15	
Contracción (%)	0.21	0.27	0.29	
Límites (%)	<0.065	<0.065	<0.065	

Tabla 5. Dimensiones y contracción de los tabicones para 7, 14, 28 días para $A/C = 1.0$.

	Largo	Ancho	Alto	Norma
7 días				
Dimensiones (cm)	28.3	15.08	10.3	NMX C-038-2013
Límite máximo (cm)	30	10 a 30	15	
Contracción (%)	0.49	0.46	0.48	NMX C-024-2012
Límites (%)	<0.065	<0.065	<0.065	
14 días				
Dimensiones (cm)	28.35	14.90	10.36	NMX C-038-2013
Límite máximo (cm)	30	10 a 30	15	
Contracción (%)	0.28	0.23	0.22	NMX C-024-2012
Límites (%)	<0.065	<0.065	<0.065	
28 días				
Dimensiones (cm)	28.1	14.9	10.1	NMX C-038-2013
Límite máximo (cm)	30	10 a 30	15	
Contracción (%)	0.19	0.19	0.14	
Límites (%)	<0.065	<0.065	<0.065	

bachada fue de 50 piezas, pero para esta investigación se seleccionaron 36 piezas para ser probadas 12 piezas a cada una de las 3 edades mencionadas, y los resultados se muestran en las **Tablas 4-8**.

Las dimensiones promedio de los tabicones cumplen para elementos no estructurales tales como muros colindantes, bardas o muros diafragma; aunque las dimensiones de las piezas están dentro de los límites, sus valores presentan variación debido al estado de los moldes. En las **Tablas 4 y 5** se aprecia que todas las piezas para cualquier dosificación y edad no cumplen con la contracción máxima de 0.065%, es decir, los tabicones tienen una contracción plástica alta generalmente asociado al proceso de curado (Maurello *et al.*, 2020): además se observa que la contracción disminuye conforme llega a 28 días de curado y este valor es mayor en la bachada donde se emplea más agua.

La **Tabla 6** muestra los resultados de la apariencia de los tabicones no estructurales para cualquier edad y relación A/C, como se puede observar que en concordancia con la NMX C-441-2013, no presentan irregularidades.

La **Tabla 7** muestra el peso volumétrico, la humedad y las absorciones de los tabicones para las dos relaciones A/C y para las 3 edades de prueba. En dicha tabla se puede observar que los pesos volumétricos para ambas relaciones A/C no tienen diferencias significativas, pero conforme envejecen dichos valores disminuyen debido a la pérdida del agua de mezclado durante el curado (Vargas *et al.*, 2006), por ser piezas no estructurales no se tienen limitantes para esta propiedad. La humedad actual, la absorción y succión inicial se incrementaron conforme al incremento de la edad de curado; se puede observar que la humedad fue mayor debido a las condiciones de curado, y el incremento en la absorción

Tabla 6. Apariencia de los tabicones ligeros.

	Seccionadas	Defectos	Velos	Apariencia
Límites	Dos piezas	Grietas, ampollas y otros defectos	Diferencia de color	Sin imperfecciones a 3 metros de observación
A/C =1.0				
Acabado	Sin irregularidades	Sin irregularidades	Sin irregularidades	Sin irregularidades
A/C =1.2				
Acabado	Sin irregularidades	Sin irregularidades	Sin irregularidades	Sin irregularidades

Tabla 7. Masa volumétrica y humedad de los tabicones.

	A/C = 1.0	A/C = 1.2	Límite	Norma
7 días				
Masa volumétrica (gr/cm ³)	1.230	1.278		NMX C038-2013
Humedad actual (%)	8.6	6.10	<5%	NMX C037-2013
Absorción (%)	10.6	10.53	<25%	NMX C037-2013
Absorción inicial (%)	5.2	4.79	<5 gr/min	NMX C404-2012
14 días				
Masa volumétrica (gr/cm ³)	1.16	1.11		NMX C038-2013
Humedad actual (%)	11.3	8.14	<5%	NMX C037-2013
Absorción (%)	15.1	16.61	<25%	NMX C037-2013
Absorción inicial (%)	9.23	8.96	<5 gr/min	NMX C404-2012
28 días				
Masa volumétrica (gr/cm ³)	1.054	1.065		NMX C038-2013
Humedad actual (%)	11.2	8.82	<5%	NMX C037-2013
Absorción (%)	21.1	18.49	<25%	NMX C037-2013
Absorción inicial (%)	14.78	12.30	<5 gr/min	NMX C404-2012

Tabla 8. Propiedades mecánicas de los tabicones no estructurales.

	7 días	14 días	28 días	Norma
A/C = 1.0				
Compresión simple (MPa)	1.72	2.31	3.72	NMX C 036-2013
Límite (MPa)	>3.43	>3.43	>3.43	NMX C441-2013
Módulo de ruptura (MPa)	1.15	1.21	0.91	ASTM C 293-16
Límite (MPa)	>2.65	>2.65	>2.65	
A/C =1.2				
Compresión simple (MPa)	3.63	4.12	5.85	NMX C 036-2013
Límite (MPa)	>3.43	>3.43	>3.43	NMXC441-2013
Módulo de ruptura (MPa)	0.58	0.50	0.49	ASTM C 293-16
Límite (MPa)	>2.65	>2.65	>2.65	

ya la succión inicial es debido a que el agua de mezclado tiene la función facilitar la vibrocompresión y no tanto coadyuvar al fraguado, por lo que los tabicones se desecaron. La absorción inicial y la humedad son superiores a los límites establecidos en la norma, lo que implica que los tabicones tienen una susceptibilidad excesiva a la presencia de agua con consecuencia negativa sobre sus propiedades tales como el trabajaje de los acabados y reacciones químicas indeseables, así mismo, la absorción está dentro de los límites de la norma por lo que la habilitación de las piezas en el mampuesto no demandará agua en demasía lo que permitirá un mejor fraguado en el mortero de asentado.

En la **Tabla 8** se presentan las propiedades mecánicas promedio, donde se observa que la resistencia a compresión simple es mayor a 3.43 MPa en cualquier edad por las muestras elaboradas con A/C= 1.2 y solo a 28 días para las muestras con A/C=1.0. Entonces las propiedades mecánicas menores de la A/C=1.0 están asociadas a que el agua de mezclado no fue suficiente para coadyuvar en el fraguado del tabicón reduciendo significativamente su resistencia a compresión simple. Finalmente, el valor del módulo de ruptura determinado en todas las muestras es menor al encontrado por otros autores que es de 2.65 MPa (Marshalls, 2024), pero es de esperarse ya que se trata de un tabicón sin fines estructurales.

Conclusiones

En esta investigación se realizaron los tabicones con un valor de G/F = 6.5 sin perder de vista las propiedades básicas de la pomacita, tales como el alto grado absorción,

que podría tener efectos negativos sobre el agua necesaria para el mezclado y en el proceso de curado, así como la presencia de granos gruesos que otorgan una textura porosa al tabicón y que inducen falla por aplastamiento. Las propiedades del CPC 30R empleado por Zoquite son adecuadas para la elaboración de los tabicones y cumplieron ampliamente la normativa. Las dimensiones de los tabicones ligeros tienen variación debido a las condiciones geométricas de los moldes.

En este caso de estudio, se determinó la contracción, que no es requisito para este tipo de prefabricados, y se concluyó que es superior a la permitida por la normativa, por lo que el curado en cámara no coadyuvó en la reducción de esta propiedad. El agua de mezclado no fue suficiente para generar la hidratación completa del CPC 30R, además de que el geomaterial absorbió una cantidad importante del agua de mezclado evitando las reacciones de hidratación del cemento Portland, limitando lograr la resistencia de diseño.

Respecto a las propiedades mecánicas, el módulo de ruptura a la flexión no cumplió con los valores mínimos sugeridos en la norma, pero son valores usuales para el caso de tabicones para uso no estructural. Con respecto a la resistencia a compresión simple, se cumplió con el valor mínimo de 3.43 MPa, para los 28 días de curado, obteniendo mayor valor en la relación A/C = 1.2 que es la desarrollada empírica por Zoquite.

Referencias

ASTM (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate* (ASTM C127-15). <https://www.astm.org/c0127-15.html>

- ASTM (2016). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)* (ASTM C293/C293M-16). https://www.astm.org/c0293_c0293m-16.html.
- ASTM (2019). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates* (ASTM C136-19). <https://www.astm.org/c0136-06.html>.
- ASTM (2019). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying* (ASTM C566-19). <https://www.astm.org/c0566-19.html>.
- ASTM (2021). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle* (ASTM C191-21). <https://www.astm.org/c0191-21.html>.
- ASTM (2022). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. (ASTM C128-22). <https://www.astm.org/c0128-22.html>.
- ASTM (2023). *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete* (ASTM C330/C330M-23). https://www.astm.org/c0330_c0330m-14.html.
- ASTM (2023). *Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste* (ASTM C187-23). <https://www.astm.org/c0187-23.html>.
- ASTM (2023). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. (ASTM C29/C29M-23). https://www.astm.org/c0029_c0029m-23.html.
- ASTM (2023). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement* (ASTM C188-17(2023)). <https://www.astm.org/c0188-17r23.html>.
- Chavez Valencia LE (2023). Propuesta de gestión estratégica para la empresa Materiales de Construcción Zoquite. *Management Review* 8(1):33-52. doi:10.18583/umr.v8i1.218.
- León MP (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Revista Ingeniería de Construcción* 25(2):215-240. doi:10.4067/S0718-50732010000200003.
- Luna-Altamirano KA, Zamora-Zamora EG, Calle-Masache OR, Lituma-Yascaribay MA (2021). Modelo de competitividad a través de la calidad e innovación como factores de rentabilidad empresarial. *Domino de las ciencias* 7(3):990-1005. doi:10.23857/dc.v7i3.2035.
- Marshalls (17 de 07 de 2024). Brick Technical Bulletin: characteristics flexural strength (F_{kx}) flexural bond strength of concrete Masonry Bricks. *Marshalls Bricks and Masonry*. Obtenido de Brick Technical Bulletin: <https://media.marshalls.co.uk/image/upload/v1612168706/Characteristic-Flexural-Strength-BTB16.pdf>.
- Maurello J, Mondragón K, Romero C (2020). Principales tipos de contracción, efectos sobre el concreto y sus métodos de mitigación (Apuntes). *Escuela Colombiana de Ingeniería*. pp 50. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1374/Maurello%20Porras%2C%20Juan%20Felipe-2020%20.pdf?sequence=6&isAllowed=y>.
- ONNCCE (24 de 06 de 2024). *Catálogo de Normas*. <https://onncce.org.mx/servicios/normalizacion/nuevas-normas-mexicanas?view=category>.
- Vargas G, Urzúa D, Gutiérrez H (2006). Influencia de la mezcla y del curado en la calidad del tabicón elaborado en la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Ingeniería* 10(1):25-38. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen10/influencia.pdf>.



Calidad de tabicones pesados con adición perlas de poliestireno pre-expandidas (EPS)

Quality of heavy bricks with addition of pre-expanded polystyrene beads (EPS)

Luis Elías Chávez Valencia^{1*} , Saul Villalobos Pérez¹ , Wilfrido Martínez Molina² , Mauricio Arreola Sánchez² 

¹ Departamento de ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Historial

Manuscrito recibido: 2 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 12 de septiembre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Luis Elías Chávez Valencia

e-mail: lechavez@ugto.mx

ORCID: 0000-0003-0830-7747

Resumen

La empresa Zoquite, ubicada en la ciudad de Guanajuato, en una de sus facetas se dedica a la elaboración de vibrocomprimidos, siendo los tabicones los más vendidos, ya sean ligeros o pesados, cuya principal diferencia es el insumo pétreo, que para los primeros es pomacita y para los segundos es arena. En esta investigación se desarrollaron tabicones pesados con relación agua-cemento en masa de 0.5, y una proporción cemento Portland-arena en volumen de 1:3 como el mortero tipo I, en los cuales la arena fue sustituida por EPS (perlas de poliestireno expandido) de 0.5 mm de diámetro nominal en 10, 20, 30, 40, 50 y 60 por ciento en volumen. Después de determinar la calidad de los insumos materiales a través de pruebas de laboratorio y en concordancia por la ficha técnica del EPS, se elaboraron tabicones pesados y fueron curados en la cámara de curado húmedo de la Universidad de Guanajuato, lo cuales fueron caracterizados en conformidad con las normas NMX y con las ASTM. Se concluyó que el agua de mezclado tiene un efecto marcado en la absorción y en la contracción, ya que su racionamiento se realiza concibiendo la necesidad de agua para el acomodo por vibrocompresión y no tanto para hidratación del cemento Portland, así mismo, las propiedades mecánicas de los tabicones fueron incrementándose hasta alcanzar su valor mayor a 28 días de curado para todos los casos, con 11.42 MPa de resistencia a compresión simple para el testigo, cuyo valor se incrementó para la adición de 10, 20 y 30% de EPS. Así mismo, el módulo de ruptura también es influenciado positivamente por la adición de EPS.

Palabras clave: Calidad, Tabicones, Manufactura, Vibrocompresion, perlas de poliestireno expandido.

Abstract

Zoquite company, which is in the city of Guanajuato, in one of its facets, is dedicated to the production of vibrocompressed, being the bricks the best seller, whether light or heavy, whose main difference is the stone supplies, which for the former is made by pumice and the seconds by sand. In this research, sand-bricks were developed with a water-cement ratio of 0.5 and a Portland cement-sand ratio of 1:3 as a mortar type I, in which the sand was replaced by EPS with a 0.5 mm of nominal diameter in 10, 20, 30, 40, 50 and 60 percent by volume. After guaranteeing the quality of the material supplies through the laboratory tests and in accordance with the EPS technical sheet, heavy blocks were made and cured in the curing chamber of the University of Guanajuato, and then they were characterized in accordance with the NMX and with the ASTM standards. With the results, it was concluded that the mixing water has a marked effect on absorptions and contraction since its rationing is carried out considering the need for water for accommodation by vibrocompression and not so much for hydration of the Portland cement, likewise, the mechanical properties of the blocks increased until all cases reach the greatest values at 28 days of curing, with 11.42 MPa of simple compression resistance for the control blocks, whose value increased for the addition of 10, 20 and 30% EPS. Likewise, the modulus of rupture also is positively influenced by the addition of EPS.

Keywords: Quality, Blocks, Manufacturing, Vibrocompression, Expanded Polystyrene.

Introducción

El tabicón es un elemento prefabricado por vibrocompresión en forma de prisma cuadrangular que es elaborado de una mezcla de agregados pétreos y cemento Portland, si el material pétreo tiene una masa volumétrica menor a 1050 kg/m^3 se considera que es ideal para la elaboración de tabicón ligero, en caso contrario se producirá tabicón pesado de acuerdo con la NMX C-299-2010; en Guanajuato capital, el tabicón ligero es empleado como no estructural debido a que las propiedades mecánicas que puede alcanzar son limitadas y en general son elaborados con pomacita y cemento Portland, mientras que los tabicones pesados logran resistencias a compresión simple mayores a 10.8 MPa, por lo que pueden ser empleados como elementos estructurales de acuerdo con las normas mexicanas (NMX) y en general están manufacturados con arena y cemento Portland. La gran ventaja que los tabicones ligeros presentan sobre los otros elementos prismáticos de construcción es la facilidad de ser transportados a través de los callejones de la ciudad de Guanajuato, por lo que un producto que tenga propiedades mecánicas para uso estructural tal como lo es el tabicón arena-cemento hidráulico, pero con peso reducido, puede ser una opción viable para la construcción. Desde el punto de vista de los muros elaborados con tabicones aligerados, estos presentan ventajas en sollicitaciones dinámicas gracias a su bajo módulo de elasticidad (Cook, 1983) (Vijayalakshmi, 2021) además del hecho de que si los muros elaborados con este tipo de tabicones se confinan presentan un rendimiento eficaz para zonas sísmicas con baja intensidad a aquellas con moderada intensidad (Irfanullah *et al.*, 2024), lo anterior se puede hacer empleando como aditivo las perlas pre-expandidas de poliestireno, denominadas EPS por las siglas en Inglés de *expanded polystyrene*.

Así pues, ya sea pomacita o arena, el material que es homogenizado, amasado y luego vibrocomprimido requiere de control de calidad, y para el caso en estudio con mayor razón ya que la manufactura se realiza en talleres con procesos *quasi*-artesanales. Aunado a lo anterior, en el centro del estado de Guanajuato, que es donde se tiene mayor densidad poblacional, las ladrilleras contribuyen en gran medida a la contaminación, es por lo anterior que el gobierno de los tres niveles ha promovido el uso de los vibrocomprimidos en sustitución al tabique de barro.

Entonces, en tiempos recientes la importancia del uso del tabicón estructural como un sustituto al tabique o ladrillo, empleado en la edificación de viviendas, ha evidenciado la necesidad del desarrollo de piezas en

distintos tamaños, colores y materiales, pero diversos factores del entorno de la industria de la construcción han limitado el escalado de la producción a un proceso industrial para lograr así una mejor calidad de los tabicones, por lo que siguen siendo manufacturados en talleres, tal como el de Zoquite (Chavez Valencia, 2023), pues es la forma que dicha actividad económica sigue siendo rentable.

La calidad del producto, del proceso y del servicio al cliente son elementos de la competitividad empresarial (Luna-Altamirano y otros, 2021); pero esta investigación se centró en la calidad del tabicón pesado empleado con fines estructurales; que es elaborado con arena y cemento hidráulico, y empleando como aditivo el EPS, para lo cual se analizaron las propiedades de las materias primas y del tabicón resultante con base a las normas mexicanas denominadas con NMX (ONNCCE, 2024) y a las normas American Society for Testing and Materials (ASTM). Así pues, siendo el tabicón pesado, adicionado con EPS, un producto que podría reemplazar al tabique y al tabicón ligero, y que a su vez tiene una alta dependencia de la obra de mano, la determinación de la calidad de dicho producto prefabricado es transcendental y se presenta a continuación.

Metodología

Las materias primas empleadas para la elaboración son: EPS, arena y el cemento Portland hidráulico. Como el EPS de 0.5 mm de diámetro nominal es un producto fabricado, su calidad está controlada por el fabricante y fuera de alcance de este estudio, por lo que su calidad no se determinó en esta investigación. Para la caracterización de la arena se determinó: granulometría, peso específico y absorción, y humedad actual; para el cemento hidráulico se determinó: gravedad específica, consistencia normal y tiempo de fraguado. Después, los tabicones pesados fueron elaborados en el taller de Zoquite con dosificación cemento-arena 1:3, que es un mortero tipo I de acuerdo las normas técnicas complementarias (NTC-RCDF) del reglamento de construcción de la ciudad de México (Arnal, 2007), una vez transcurrido el periodo de curado, se determinó la calidad del producto para 7, 14 y 28 días.

Agregado pétreo

La granulometría se evaluó con la norma ASTM C136-06 (ASTM, 2006), donde se pasó una muestra representativa de arena por los tamices establecidos en la norma, para conocer la distribución de los diámetros de partículas; posteriormente fue ilustrado

en una gráfica granulométrica donde se analizó con respecto a las especificaciones para norma ASTM C33/C33M-18 (ASTM, 2018) debido a que los tabicones pueden idealizarse como material compuesto con matriz cementicia formado por un mortero hidráulico vibrocomprimido. Para la absorción y peso específico del agregado pétreo fino se empleó la norma ASTM C128-22 (ASTM, 2022) que permitió la evaluación de la relación entre la masa de la arena y la masa de un volumen de agua igual al volumen de las partículas del agregado, además, la prueba se realiza cuando la arena se encuentra saturada y superficialmente seca, momento en el cual se determinó la absorción. Y finalmente la humedad actual se evaluó mediante la norma ASTM C566-19 (ASTM, 2019) que permite determinar el contenido de agua en la arena. Tanto la absorción como la humedad actual no tiene limitantes, más bien, estas propiedades de la arena se usan para realizar los ajustes necesarios en el agua de amasado, así mismo, el peso específico es importante en las relaciones volumétricas y gravimétricas del material compuesto constituyente de tabicón, es decir, el mortero hidráulico.

Cemento portland

La gravedad específica del cemento hidráulico se realizó con el frasco de Le Chatelier a través de la ASTM C188-17 (ASTM, 2023) que es el peso del cemento por unidad de volumen sin considerar los vacíos del cemento. La consistencia normal del cemento hidráulico se evaluó con ASTM C18723 (ASTM, 2023) que es la cantidad de agua necesaria para que la aguja de 1cm de diámetro del aparato de Vicat penetre $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ a la pasta de cemento, durante 30 segundos. Para el tiempo de fraguado se empleó la norma ASTM C191-21 (ASTM, 2021) por el método de la aguja de VICAT. Los resultados de la evaluación de las propiedades del cemento se compararon con los estándares que la industria mexicana del cemento hidráulico ha expedido mediante las NMX, con la meta de determinar la calidad de éste y su factibilidad de uso en la elaboración del tabicón pesado.

Elaboración y curado

Los niveles de dosificación se establecieron para mortero tipo I, conforme a las NTC-RCDF, donde usa 1 volumen de cemento Portland por 3 volúmenes

de arena, dicha proporción necesaria para producir 50 piezas está formada por 10 botes de arena (200 litros), 3 botes de cemento (60 litros) de CPO 30R y 1.5 botes de agua (30 litros) que resultan en relación agua-cemento (A/C) de 0.5 que es el valor medio del rango recomendado (Muciño y Santa Ana, 2017). La adición de EPS consistió en sustituir porcentajes de la arena de 0 a 60% en volumen, ver **Tabla 1**, donde un bote equivale a 20 litros.

Para la elaboración de los tabicones testigo, la mitad del total de la dosificación de materiales para 50 piezas fue colocada paulatinamente en una mezcladora de paletas y agitada por 5 minutos, después se colocó lentamente la otra mitad para ser agitada por otros 5 minutos más; para los casos de sustitución de la arena por EPS, la perlita se colocó al final de la homogenización durante otros 10 minutos más, cuidando realizar la adición de forma lenta para evitar la segregación y formación de clústeres. Una vez que los insumos materiales fueron homogenizados, la mezcla fue vaciada al pie de la vibrocompresora (Ver **Figura 1**) para que los tabicones fueran manufacturados como sigue:

1. Se colocó una tarima de madera bajo el molde hembra (10 huecos) y estos dos sobre la mesa vibratoria, verificando que tanto la tarima y el molde quedaran sujetos por las muescas;
2. Se colocó el material en tres capas ayudando con la mano para el acomodo del material, además, en cada una de las capas se dio un preacomodo con una vibración ligera (1 a 2 segundos), y al finalizar el llenado se procuró dejar el molde colmado;
3. Se colocó el apisonador (molde macho) sobre el molde

Tabla 1. Adición de EPS a la mezcla de elaboración de tabicón pesado.

Denominación	EPS %	Arena Botes (19 L)	EPS Botes (19L)
P0	0%	10	0
P10	10%	9	1
P20	20%	8	2
P30	30%	7	3
P40	40%	6	4
P50	50%	5	5
P60	60%	4	6



Figura 1. Estación de vicompresión de los tabicones con adición de EPS.

- hembra, y se vibrocompactó el material durante 5 a 10 segundos;
4. Se levantó el apisonador para despegar el molde hembra, quedando los tabicones depositados en la tarima de madera; y
 5. Se retiró la tarima de madera con los tabicones y se llevó al sitio de curado.

El método de curado convencional consiste en cubrir los tabicones con una frazada de hule durante un periodo de 24 hora continuas (Ver **Figura 2**), para posteriormente retirar la cubierta y dejarlos a la intemperie hasta ser comercializados, no obstante, este método puede tener un



Figura 2. Curado tradicional de los tabicones pesados.

impacto negativo sobre las propiedades de los tabicones, por lo que para esta investigación, las muestras fueron llevadas al cuarto de curado en las instalaciones de la Universidad de Guanajuato (Ver **Figura 3**), con un 90% de humedad relativa y 21 °C de forma constante de conformidad a la norma NMX C-159-2016.

A los 7, 14 y 28 días de curado, a los tabicones pesados se les determinó: dimensiones y peso volumétrico conforme a la norma NMX C-038-2013, contracción según la norma NMX C-024-2012, acabados con NMX C-404-2012; aunque la humedad actual no es un parámetro que esté normalizado para los tabicones, en esta investigación se realizó como el agua retenida con respecto al estado seco y es en ese estado que se determinó la absorción inicial según la norma NMX C-037-2013; así mismo, se evaluó la resistencia a compresión simple según la norma NMX C-036-2013, y la resistencia a flexión según la norma ASTM C293/C293M-16 (ASTM, 2016) que son propiedades importantes para tabicones de uso estructural que permiten ponderar su comportamiento mecánico. El nivel de la calidad de los tabicones se determinó con base a las especificaciones de la norma NMX C-404-2012 que es para tabicones de uso estructural.

Resultados y discusión

Insumos materiales. Arena

La arena es el insumo pétreo que la empresa Zoquite trae desde el San Miguel de Allende, Guanajuato; con textura y estructura gruesa, teniendo un peso específico



Figura 3. Cámara de curado de la Universidad de Guanajuato

de 2.35 t/m^3 , una absorción de 6.39 % y una humedad 9.4 %, que, aunque estas propiedades no son limitantes si son importantes en el desarrollo del producto bajo un concepto de mayor calidad, no obstante, para esta investigación no fueron empleados y se continuó con la manufactura del tabicón de forma empírica. Así mismo, en la **Tabla 2**, se muestran los resultados de la granulometría y en la **Figura 4** se ilustra la distribución granulométrica junto con los límites indicados en la norma ASTM C33/C33M-18, que son los tamaños recomendados para concreto hidráulico, lo anterior debido a que la morfología del agregado pétreo tiene alta influencia sobre las propiedades de los materiales compuestos con matriz cementicia (León, 2010), y al no existir especificaciones normadas al respecto, se decidió emplear la relativa a concreto hidráulico.

De la **Figura 4** se puede observar que la distribución granulométrica de la arena no está dentro de los límites

recomendados, y el módulo de finura que es de 3.5 no está entre 2.3 a 3.1, que son los límites recomendados para la elaboración de concreto hidráulico (Toirac, 2012), lo que es un indicador de que la arena tiene una textura gruesa y que es coincidente con la primera observación de la morfología del insumo pétreo. Así pues, para esta investigación se decidió elaborar los tabicones con la arena de textura gruesa.

Insumos materiales. Cemento Portland

Las propiedades del cemento Portland (CPO 30R) empleado por la empresa Zoquite se muestran en la **Tabla 3**, se observa que cumple con las especificaciones de los límites inferior y superior del fraguado en concordancia con la NMX C-414-2017, así como una consistencia normal de 29.5 % que esta entre 23 y 33 %, considerado como el rango adecuado (RashedulKabir, 2017) y la gravedad específica del cemento que se encuentra entre los límites de 3.1 y 3.2 g/cm^3 reconocidos en la industria de la construcción (Obando-Angulo, 2023), por lo que al considerar que el cemento hidráulico tiene la calidad suficiente, se continuó con su uso en la producción de los tabicones estructurales.

Propiedades de los tabicones

La cantidad de tabicones pesados resultantes por la bachada fue de 50 piezas, pero para esta investigación se seleccionaron las 36 mejores piezas, descartando para fines de investigación las que presentaban daños severos de elaboración tales, como: disgregación, despostillamiento, segregación y deformación. Las 36 piezas se clasificaron para ser probadas en 12 piezas a 7 días de curado, 12 piezas a 14 días de curado y 12

Tabla 2. Granulometría de la arena

Malla	Abertura (mm)	Retenido (g)	% retenido	% acumulativo	% que pasa	Límite inferior	Límite superior
No. 4	4.76	0	0	0	100	95	100
No. 8	2.36	38.7	8.6	8.6	91.4	80	100
No. 16	1.18	43.5	9.7	18	81.7	50	85
No. 30	0.60	64.5	14.4	33	67.3	25	60
No. 50	0.255	255.1	56.9	90	10.3	5	30
No.100	0.150	29.2	6.5	96	3.8	0	10
No.200	0.075	15.9	3.5	100	0.2	0	3
Charola	0.000	1.1	0.2	100	0	0	0
	Suma	448					

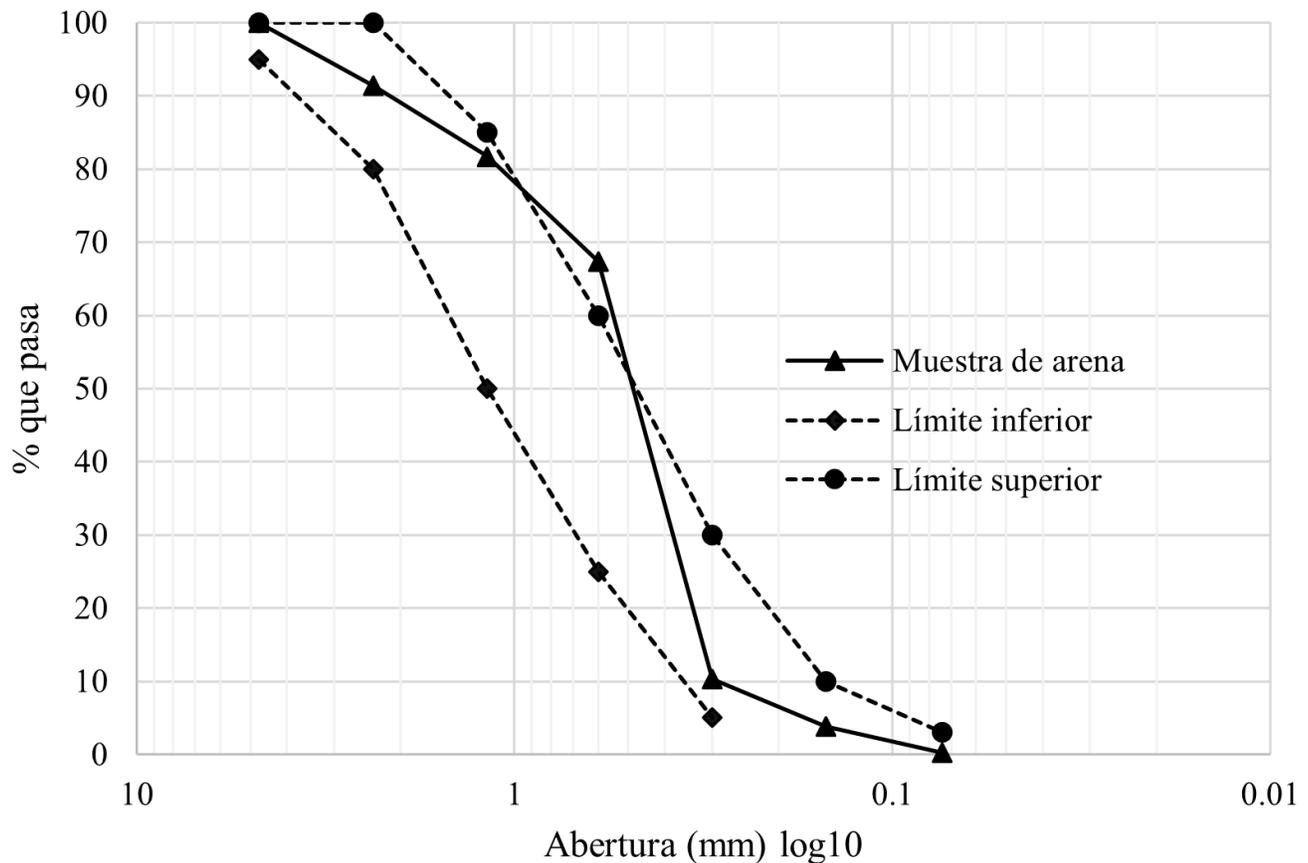


Figura 4. Distribución granulométrica de la arena y los límites de ASTM C-33/C33M-18

piezas a 28 días de curado, los resultados promedio de las propiedades de los tabicones se muestran de la **Tabla 3** a la **6** y están presentados en las **Figuras 2, 3 y 4**, respectivamente.

De acuerdo con las especificaciones de la norma NMX C-404-2012, las dimensiones no deben ser mayores a 24 cm de largo, 10 cm de ancho y 10 cm de alto, en la **Tabla 4** y en la **Figura 5** se observa que las dimensiones promedio de los tabicones cumplen; no obstante, aunque las dimensiones de las piezas están dentro de los límites, sus valores presentan una variación mayor a las

recomendadas por la norma citada y esto se debe al mal estado de los moldes. Así mismo, la contracción para (Ver **Figura 6**) todas las piezas en cualquier dosificación y edad no cumple con la contracción máxima de 0.065% de conformidad a la norma en comento, es decir, que los tabicones tienen una contracción plástica alta, que generalmente está asociada al proceso de curado (Maurello y otros, 2020); además, la contracción disminuye sensiblemente a 28 días de curado, y podría estar asociada a que el agua empleada está concebida para la vibrocompactación y no para el fraguado del cemento hidráulico. Los resultados de la apariencia de los tabicones estructurales para cualquier edad y sustitución de EPS, en concordancia con la norma NMX C-404-2012, no presentan irregularidades en apariencia, velos, defectos o piezas seccionadas, lo anterior gracias a la selección previa de los mismos.

La **Tabla 5** muestra el peso volumétrico, la humedad y las absorciones de los tabicones para 7, 14 y 28 días de curado. En dicha tabla y en la **Figura 7**, se puede observar que los pesos volumétricos para las diversas

Tabla 3. Propiedades del CPO 30R empleado por Zoquite.

Propiedad	Resultado	Límite inferior	Límite superior
Gravedad	3.15 g/cm ³	3.1 g/cm ³	3.2 g/cm ³
Consistencia normal	29.5%	23%	33%
Fraguado inicial	75 minutos	45 minutos	-----
Fraguado final	580 minutos	-----	600 minutos

Tabla 4. Dimensión y contracción de los tabicones para 7, 14, 28 días.

Denominación	Dimensión	Dimensión	Dimensión	Contracción	Contracción	Contracción
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Largo (%)	Ancho (%)	Alto (%)
7 días						
P0	28.10	14.08	10.23	0.36	0.28	0.27
P10	28.23	14.05	10.53	0.39	0.32	0.29
P20	28.03	13.85	10.58	0.36	0.30	0.28
P30	28.03	13.97	9.98	0.29	0.28	0.26
P40	27.98	14.30	9.50	0.28	0.24	0.25
P50	28.10	14.09	9.57	0.29	0.22	0.21
P60	28.05	14.07	10.21	0.27	0.19	0.21
14 días						
P0	28.15	14.40	10.18	0.31	0.24	0.23
P10	28.15	14.50	10.30	0.29	0.30	0.29
P20	28.23	14.45	10.55	0.27	0.28	0.24
P30	28.30	15.08	10.30	0.21	0.24	0.22
P40	28.35	14.90	10.36	0.29	0.22	0.22
P50	28.10	14.90	10.10	0.21	0.20	0.19
P60	28.18	14.35	10.12	0.25	0.20	0.20
28 días						
P0	28.37	14.38	10.40	0.28	0.18	0.19
P10	28.14	14.12	10.12	0.23	0.29	0.29
P20	28.23	14.26	10.22	0.22	0.21	0.19
P30	28.37	14.78	10.23	0.18	0.19	0.18
P40	28.45	14.42	10.35	0.19	0.18	0.18
P50	28.45	14.10	10.42	0.19	0.17	0.17
P60	28.46	14.02	10.35	0.14	0.15	0.14

sustituciones de EPS tienen diferencias que no son significativas, y conforme transcurre el tiempo de curado dichos valores van disminuyendo debido a la pérdida del agua de mezclado inicial (Vargas y otros, 2006), ya sea por evaporación o por consumo para fraguado del CPO 30R. Los valores promedio del peso volumétrico son mayores a 1.5 g/cm^3 , excepto para P60, que se consideran adecuados de conformidad a las NTC-RCDF.

Así mismo, la humedad actual es menor a 5%, que es la humedad remanente en las piezas después de que son extraídas de la cámara de curado y secadas a la intemperie por al menos 24 horas (Ver **Figura 8 y 9**). A partir de esa condición se determinó la absorción y absorción inicial que de acuerdo con los resultados estos valores disminuyeron conforme al incremento del tiempo de curado, pero aún son menores a la especificación de

la norma NMX C-404-2012, por lo que la habilitación de las piezas en el mampuesto no demandará agua en demasía, lo que permitirá un mejor fraguado en el mortero de asentado.

En la **Tabla 6** se pueden observar las propiedades mecánicas del promedio de 12 piezas para 7, 14 y 28 días de curado y en la **Figura 10** se muestran estos resultados, y debido a que los tabicones son estructurales, la resistencia a compresión simple debe ser mayor a 10.8 MPa, de acuerdo con la norma NMX C-404-2012 o mayor a 9.8 MPa, de conformidad a las NTC-RCDF, lo cual es alcanzada a 28 días de edad de curado solo para P0, P10, P20 y P30. Así mismo, en dicha tabla se puede observar el incremento continuo de las propiedades mecánicas de los tabicones de acuerdo al transcurso del tiempo, lo que es un indicador de un buen

Tabla 5. Peso volumétrico y las humedades de los tabicones.

Denominación	Peso volumétrico (g/cm ³)	Humedad actual (%)	Absorción (%)	Absorción inicial (g/min)
Limite	1.5		<12%	<5 g/min
Norma	NTC-RCDF		NMX C404-2012	NMX C404-2012
7 días				
P0	1.95	3.78	10.96	4.21
P10	1.93	4.62	9.85	4.22
P20	1.76	4.67	10.24	4.05
P30	1.85	4.25	8.14	3.89
P40	1.80	3.59	11.51	3.75
P50	1.68	4.12	12.90	3.52
P60	1.47	3.98	12.84	3.50
14 días				
P0	1.90	4.78	7.29	4.11
P10	1.92	3.87	7.25	4.12
P20	1.73	4.12	6.58	3.95
P30	1.73	3.45	6.66	3.71
P40	1.77	4.25	7.63	3.57
P50	1.67	4.10	9.14	3.45
P60	1.43	4.32	8.81	3.45
28 días				
P0	1.87	4.91	4.60	4.06
P10	1.90	4.05	6.37	4.02
P20	1.80	2.58	4.25	3.85
P30	1.82	4.14	2.75	3.56
P40	1.70	4.06	4.14	3.42
P50	1.57	4.83	5.67	3.28
P60	1.44	3.56	4.85	3.28

proceso de fraguado del cemento. Además, el valor del módulo de ruptura determinado en todas las muestras a 28 días de curado es mayor a los valores reportados por investigadores, que es de 2.7 MPa (Marshalls, 2024), sólo para P0, P10, P20 y P30.

Cuando ya se ha dado el fraguado final del material compuesto se puede observar que la adición de EPS para P10, P20 y P30 incrementa las propiedades mecánicas por encima de P0 y por arriba de los límites establecidos en la normativa, pero la disminución de la masa volumétrica es marginal, de 1.87 g/cm³ en P0 a 1.82 g/cm³ en P30 (2.67% menos de masa), y muy lejano de los valores obtenido en los tabicones ligeros que es de 1.1 g/cm³, (41.15% menos de masa) por lo que el tabicón arena-EPS no es un candidato para sustituir al tabicón

de pomacita.

Conclusiones

Después de analizar la granulometría y comparar los resultados con la normativa, se puede concluir que la arena tiene una textura de granos gruesos que otorgan al tabicón mayor porosidad con consecuencias negativas durante la elaboración, ya que la vibración segrega a la mezcla con mayor facilidad, y el producto presenta mayor cantidad de huecos que inducen falla por aplastamiento, por lo que puede ser sustituida como insumo por una de mejor calidad, pero requiere un estudio alterno al presente. Así mismo, las propiedades del EPS se consideraron de calidad según la ficha técnica; el CPO 30R empleado cumple con los requisitos

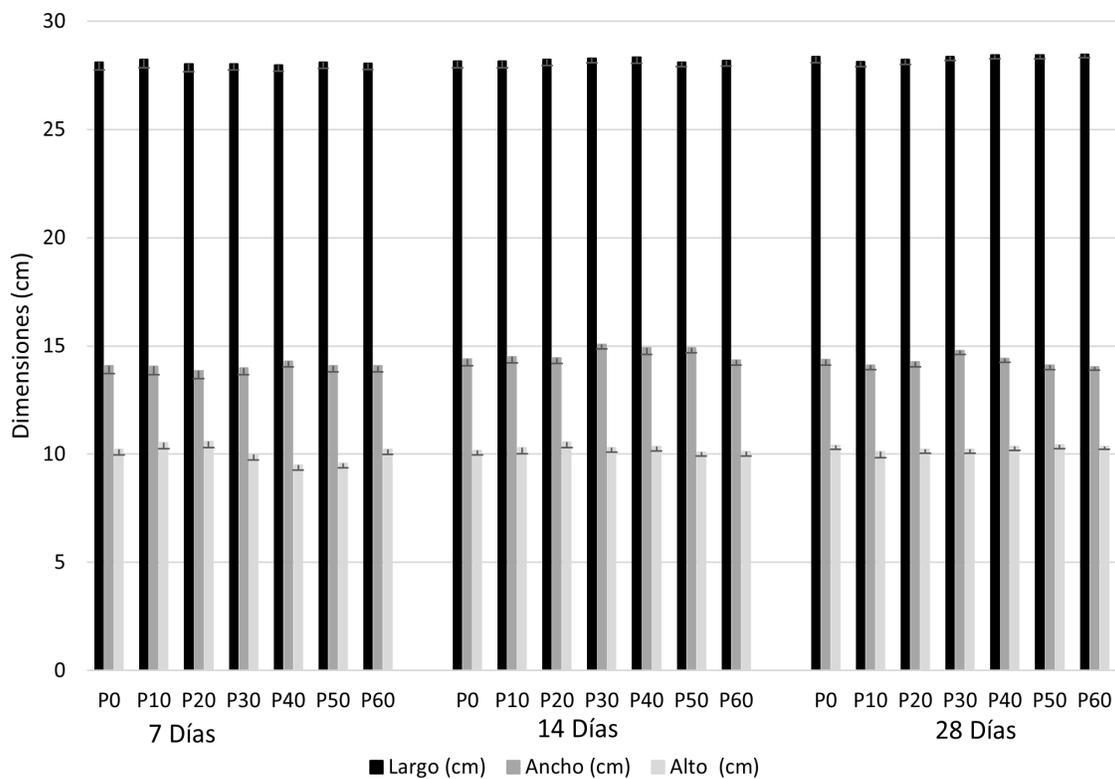


Figura 5. Dimensión de los tabicones para 7, 14, 28 días.

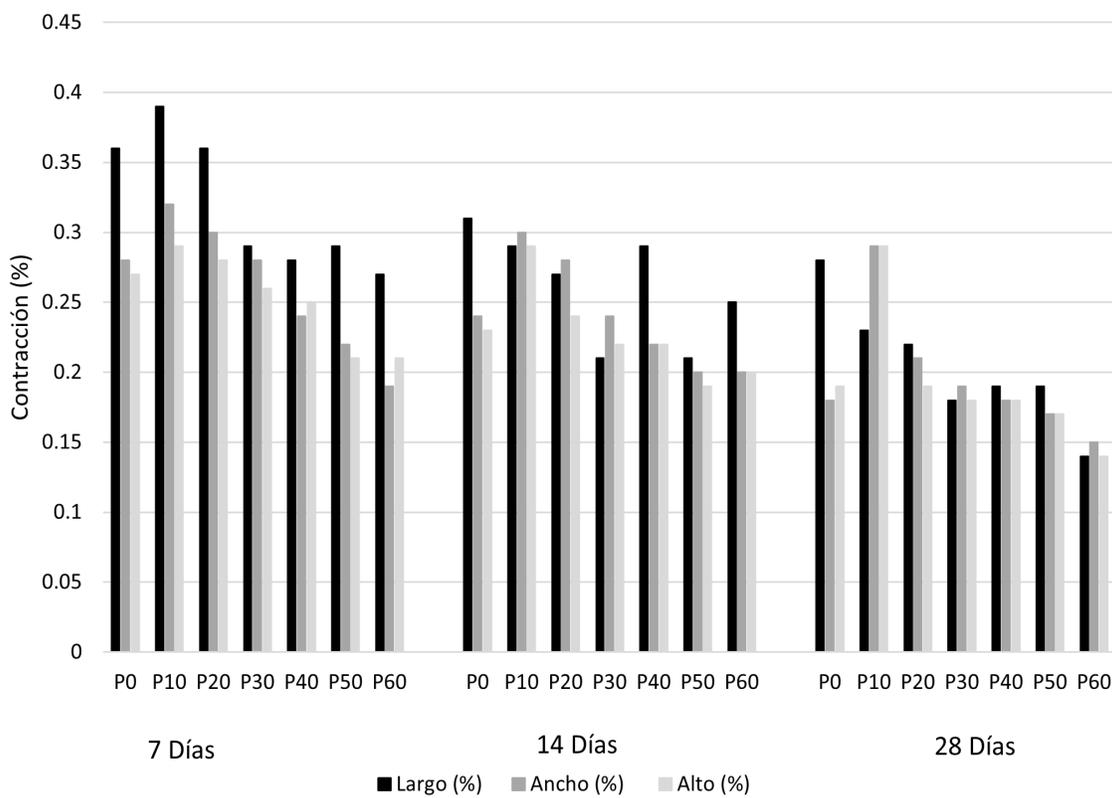


Figura 6. Contracción de los tabicones para 7, 14, 28 días.

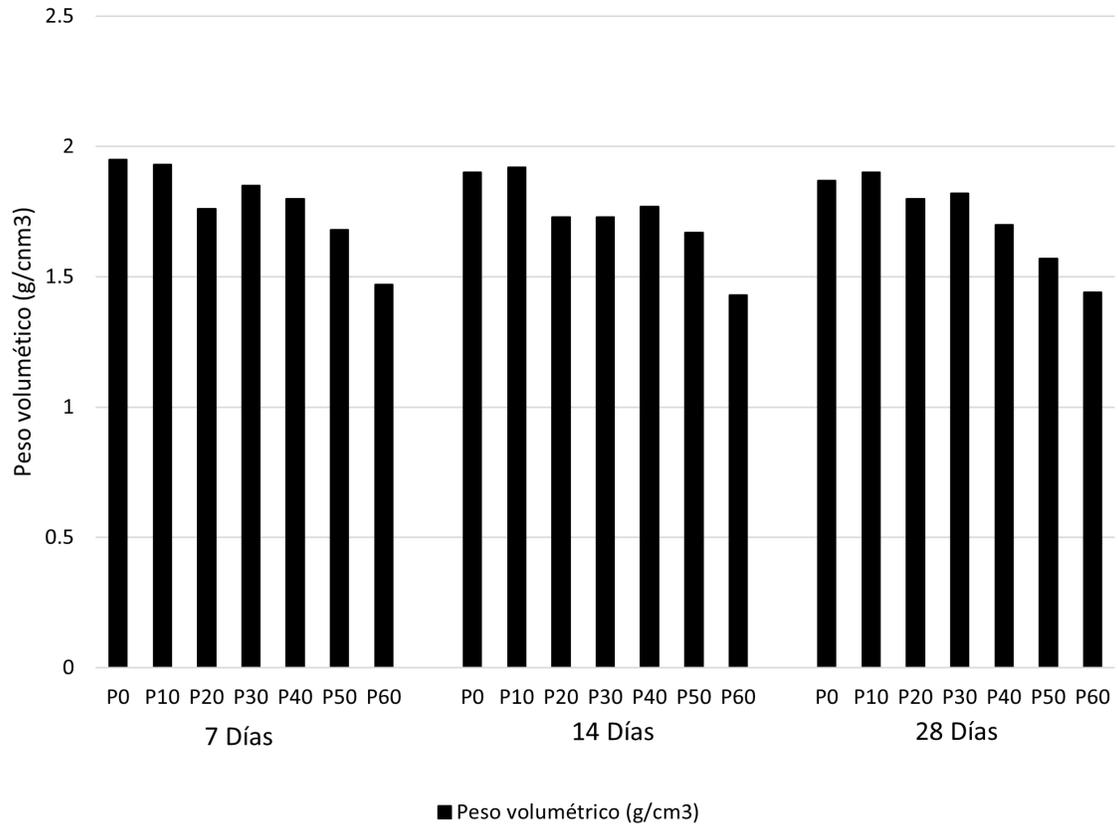


Figura 7. Peso volumétrico de los tabicones para 7, 14 y 28 días.

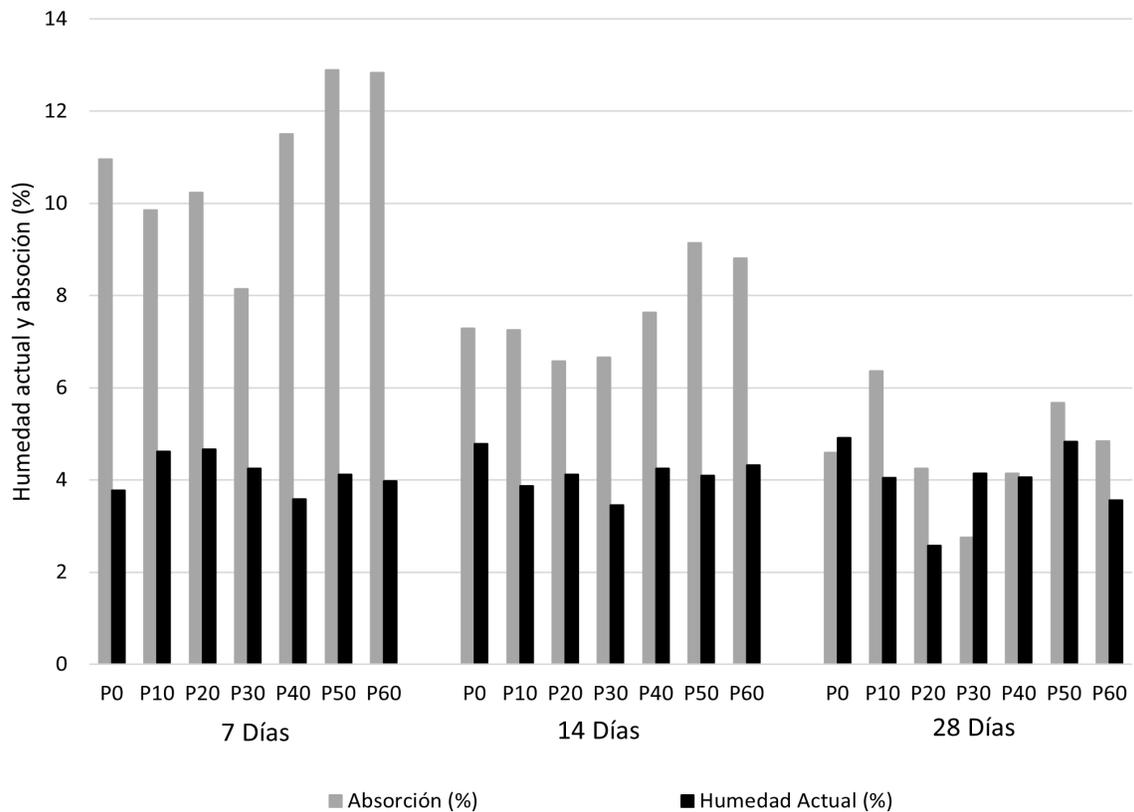


Figura 8. Absorción, absorción inicial y humedad actual de los tabicones para 7, 14 y 28 días.

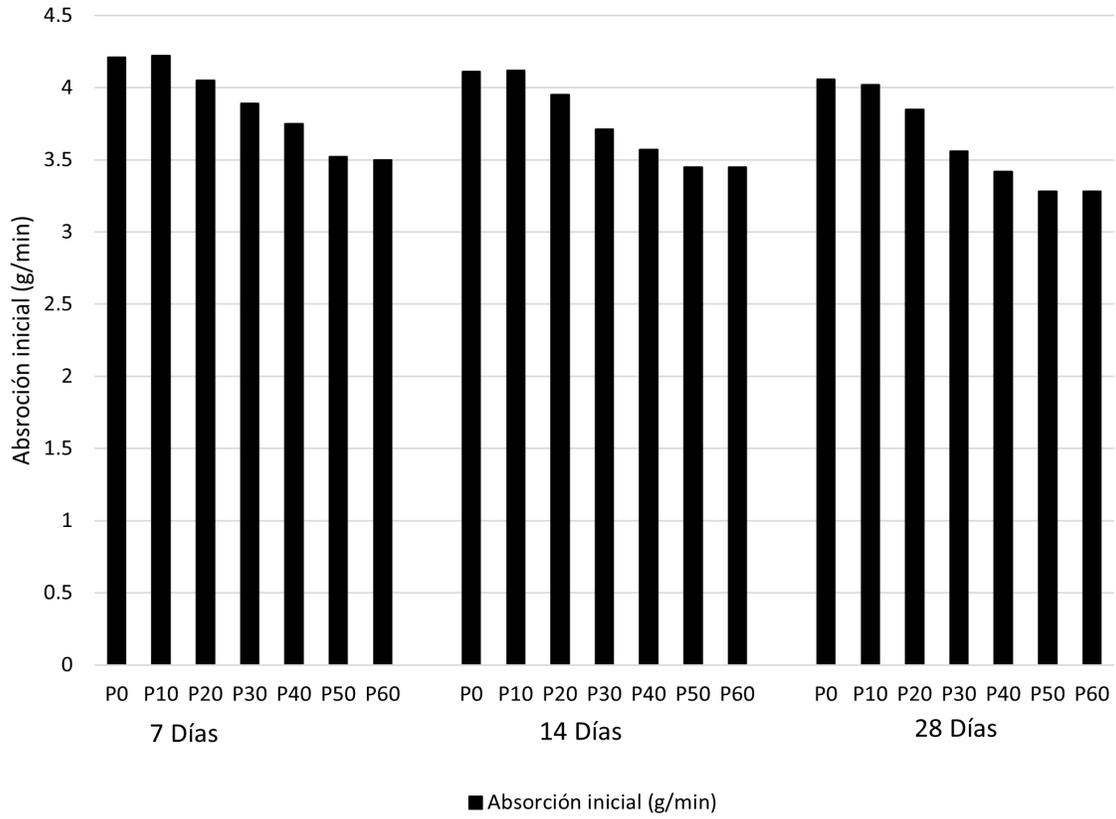


Figura 9. Absorción inicial de los tabicones para 7, 14 y 28 días.

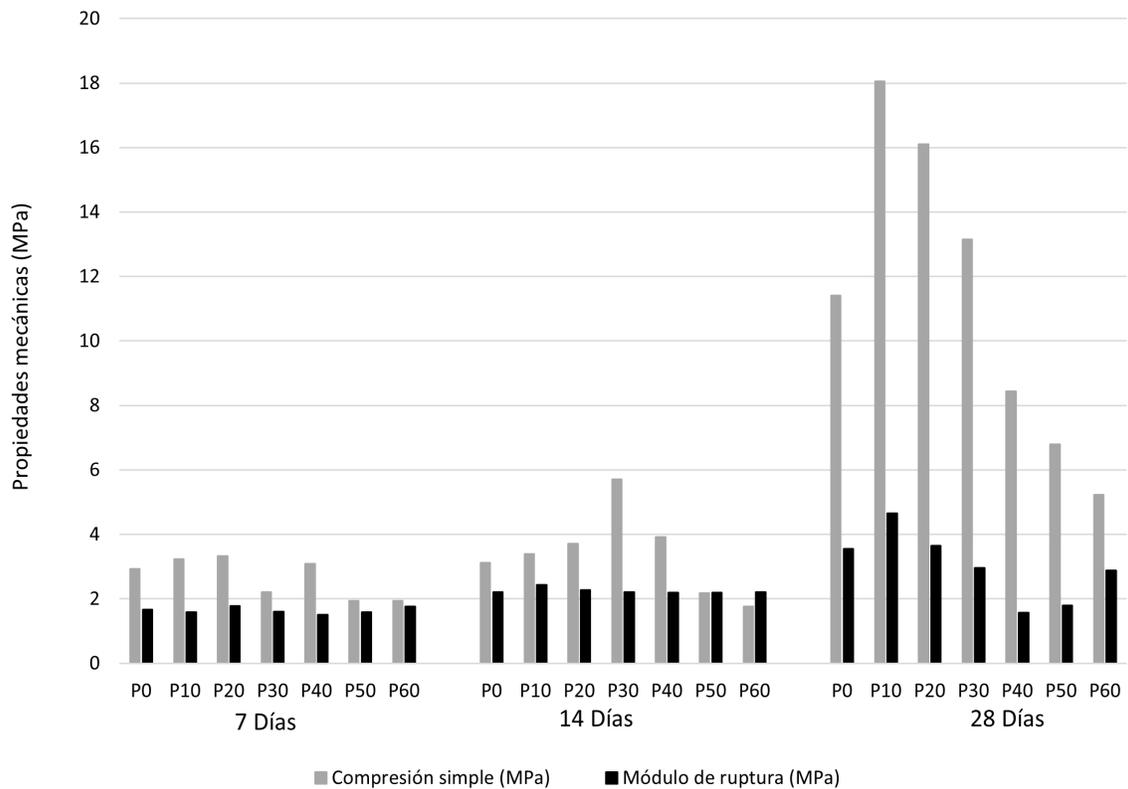


Figura 10. Propiedades mecánicas de los tabicones estructurales.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de los tabicones estructurales.

Denominación	Compresión simple (MPa)	Módulo de ruptura (MPa)
7 días		
P0	2.93	1.67
P10	3.24	1.59
P20	3.33	1.79
P30	2.21	1.61
P40	3.09	1.51
P50	1.95	1.59
P60	1.94	1.77
14 días		
P0	3.13	2.21
P10	3.39	2.43
P20	3.71	2.28
P30	5.71	2.21
P40	3.92	2.19
P50	2.18	2.19
P60	1.77	2.21
28 días		
P0	11.42	3.55
P10	18.05	4.66
P20	16.11	3.65
P30	13.15	2.97
P40	8.44	1.57
P50	6.79	1.80
P60	5.24	2.89

de la normatividad relativa.

Las dimensiones de los tabicones pesados tienen variación debido a que los moldes son elaborados artesanalmente, carecen de mantenimiento y se encuentran maltratados por la vibrocompactadora, lo que conlleva que los prismas sean un tanto irregulares, y que induzcan falla por aplastamiento. Así mismo, la contracción, como indicador del proceso de fraguado es mayor a la permitida por la norma lo que implica que el tabicón se desecó, pero dicha pérdida de agua disminuye a los 28 días de curado, ya que también disminuyó el agua necesaria para la reacción química del cemento hidráulico; esta falta de agua identificada en la absorción y la absorción inicial, se debe a que durante el mezclado se adiciona sólo la requerida para homogenización y no para la hidratación del cemento hidráulico Portland,

además dicha desecación es acentuada debido a la absorción relativamente alta de la arena (Solís-Carcaño, 2019).

De las propiedades mecánicas se concluye que estas fueron incrementando conforme al tiempo de elaborado y curado, logrando sus mejores atributos a 28 días, donde la resistencia a compresión simple de las muestras de referencia o patrones (P0) obtuvieron un valor promedio de 11.42 MPa, que cumple con las especificaciones del reglamento de construcciones y de la normatividad relativa. Así mismo, se concluye que la adición de EPS resulta en un impacto positivo en las propiedades mecánicas, pues la adición de 10, 20 y 30 % en volumen en sustitución de la arena incrementaron en aproximadamente 20, 40 y 60 % a la resistencia a compresión simple, aunado a que el módulo de ruptura también es influenciado positivamente, aunque no en el mismo grado que la resistencia a compresión simple.

Referencias

Arnal L (2007). *Reglamento de construcciones para el distrito federal*. México: Trillas.

ASTM (2006). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates* (ASTM C136-06). Obtenido de <https://www.astm.org/c0136-06.html>.

ASTM (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate* (ASTM C127-15). Obtenido de <https://www.astm.org/c0127-15.html>.

ASTM (2016). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)* (ASTM C293/C293M-16). Obtenido de https://www.astm.org/c0293_c0293m-16.html.

ASTM (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates* (ASTM C33/C33M-18). Obtenido de https://www.astm.org/c0330_c0330m-14.html.

ASTM (2019). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying* (ASTM C566-19). Obtenido de <https://www.astm.org/c0566-19.html>.

ASTM (2021). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle* (ASTM C191-21). Obtenido de <https://www.astm.org/c0191-21.html>.

ASTM (2022). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. (ASTM

C128-22). Obtenido de <https://www.astm.org/c0128-22.html>.

ASTM (2023). *Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste* (ASTM C187-23). Obtenido de <https://www.astm.org/c0187-23.html>.

ASTM (2023). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. (ASTM C29/C29M-23). Obtenido de https://www.astm.org/c0029_c0029m-23.html.

ASTM (2023). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement* (ASTM C188-17(2023)). Obtenido de <https://www.astm.org/c0188-17r23.html>.

Chavez Valencia LE (2023). Propuesta de gestión estratégica para la empresa Materiales de Construcción Zoquite. *Management Review* 8(1):33-52. doi:10.18583/umr.v8i1.218.

Cook CR (1983). *FIP manual of lightweight aggregate concrete*. Scotland: Surrey University Press. doi:[https://doi.org/10.1016/0262-5075\(83\)90076-3](https://doi.org/10.1016/0262-5075(83)90076-3).

Irfanullah, Gul A, Khan K, Khan IU, ElDin HMS, Azab M, Shahzada K (2024). Improving the lateral load resistance capacity of cellular lightweight concrete (CLC) block masonry walls through ferrocement overlay. *Applications in Engineering Science* 18:100180. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applsc.2024.100180>.

León MP (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Revista ingeniería de construcción* 25(2):215-240. doi:10.4067/S071850732010000200003.

Luna-Altamirano KA, Zamora-Zamora EG, Calle-Masache OR, Lituma-Yascaribay MA (2021). Modelo de competitividad a través de la calidad e innovación como factores de rentabilidad empresarial. *Domino de las ciencias* 7(3):990-1005. <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i3.2035>.

Marshalls (17 de 07 de 2024). Brick Technical Bulletin: characteristics flexural strength (F_{lx}) flexural bond strength of concrete Masonry Bricks. *Marshalls Bricks and Masonry*. Obtenido de Brick Technical Bulletin: <https://media.marshalls.co.uk/image/upload/v1612168706/Characteristic-Flexural-Strength-BTB16.pdf>.

Maurello J, Mondragón K, Romero C (2020). Principales

tipos de contracción, efectos sobre el concreto y sus métodos de mitigación (Apuntes). *Escuela Colombiana de Ingeniería*. pp 50. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1374/Maurello%20Porras%2C%20Juan%20Felipe-2020%20.pdf?sequence=6&isAllowed=y>.

Muciño A, Santa Ana P (2017). *Dosificación de cementos con agregado finos*. CDMX: UNAM. Obtenido de https://leias.fa.unam.mx/wpcontent/uploads/2018/05/180515_Practica7_W_LMSE.pdf.

Obando-Angulo VM (2023) Valor del peso específico del cemento para diseño de concretos. *Revista Tecnología en Marcha* 36(4):59-67. doi:10.18845/tm.v36i4.6311.

ONNCCCE (24 de 06 de 2024). *Catálogo de Normas*. Obtenido de <https://onnccce.org.mx/servicios/normalizacion/nuevas-normas-mexicanas?view=category>.

RashedulKabir M (2017). *Engineering Materials Lab*. Bangladesh: Ahsanullah University of Science and Technology. Obtenido de http://www1.aust.edu/civil/lab_manual/ce_202.pdf.

Solís-Carcaño RG, Alcocer-Fraga MA (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería Investigación y Tecnología* 20(04):1-13. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2019.20n4.039>.

Toirac J (2012). Caracterización granulométrica de las plantas productoras de arena en la República Dominicana, su impacto en la calidad y costo del hormigón. *Ciencia y Sociedad XXXVII(3):293-334*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/870/87024622003.pdf>.

Vargas G, Urzúa D, Gutiérrez H (2006). Influencia de la mezcla y del curado en la calidad del tabicón elaborado en la zona metropolitana de Guadalajara. *Ingeniería* 10(1):25-38. Obtenido de <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen10/influencia.pdf>.

Vijayalakshmi R (2021). Investigation on the Mechanical Property and Crack Arresting Mechanism of Natural Jute Fiber used as Reinforcement for Lightweight Concrete Masonry Prism. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1126(1):012064. doi:10.1088/1757-899X/1126/1/012064.



Descripción de recolector de lodos en un tanque sedimentador para el tratamiento de agua potable

Description of sludge collector in a sedimentation tank for drinking water treatment

Jorge Eduardo Campos García, Renato González Bernal*, Juan José Piña Castillo, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez, Víctor Daniel Jiménez Macedo

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia 403, Morelia, 58000. México.

Historial

Manuscrito recibido: 22 de agosto de 2024
Manuscrito aceptado: 31 de octubre de 2024
Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Renato González Bernal
E-mail: regonzalez@umich.mx.

Resumen

El presente trabajo se realizó para la planta potabilizadora de agua de Vista Bella en Morelia, Michoacán, alimentada con agua proveniente de la presa de Cointzio, la cual cada vez trae más residuos sólidos. La limpieza de los tanques sedimentadores se hace de forma manual, cada 3 o 4 meses dependiendo de la acumulación de lodos, lo que conlleva a un riesgo del personal operario. El objetivo es transformar la forma en que se recolectan los lodos en el tanque sedimentador, para lo cual se estudiaron las diversas formas existentes de extracción de lodos y se eligió un sistema de purga utilizando el diferencial de presión hidrostática, con lo que se espera un ahorro económico, energético y de recurso natural. El extractor de lodos propuesto permitiría alargar el periodo de lavado de los tanques, lo que contribuirá en un menor desperdicio del recurso hidráulico y mantendrá a los operarios sin riesgos. Este sistema automatizado extraerá los lodos de forma más eficiente, modificando la purga que se hace de forma manual y evitará la acumulación de los lodos en el tanque, manteniéndolos más limpios.

Palabras clave: Tanque de sedimentación, purga de lodos, presión hidrostática, planta potabilizadora.

Introducción

El concepto de tanque de sedimentación ideal fue desarrollado por Hazen (Hazen, 1904), y es la base para llegar a las relaciones utilizadas en el diseño de tanques de sedimentación. Hazen introdujo una visión idealizada para describir el flujo y el proceso de sedimentación de soluciones diluidas en sedimentadores

Abstract

This work was carried out for the Vista Bella water treatment plant in Morelia, Michoacán, fed with water from the Cointzio dam, which brings more and more solid waste. The cleaning of the sedimentation tanks is done manually, every 3 or 4 months depending on the accumulation of sludge, which leads to a risk for the operating personnel. The objective is to transform the way in which sludge is collected in the sedimentation tank, for which the various existing forms of sludge extraction were studied and a purge system was chosen using the hydrostatic pressure differential, which is expected to save economic, energy and natural resources. The proposed sludge extractor would extend the washing period of the tanks, which will contribute to less waste of the hydraulic resource and keep operators without risks. This automated system will extract the sludge more efficiently, modifying the purge.

Keywords: Sedimentation tank, sludge purge, hydrostatic pressure, water treatment plant.

rectangulares, donde exponía un elemento con un campo de velocidades uniformes, es decir, un flujo pistón, con partículas de sedimentación vertical, sin turbulencia, y con una independencia entre el flujo y la sedimentación y sin influencias de la densidad.

En la descripción del flujo de Hazen, se introdujo además el concepto de carga superficial, exponiendo que

todas las partículas con una velocidad de sedimentación mayor a la carga hidráulica superficial pueden sedimentar hasta el fondo antes de llegar al final de la pared del sedimentador, refiriéndose fundamentalmente al caso de decantadores rectangulares diseñados como largos canales donde las partículas sedimentan mientras se dirigen hacia la salida del canal.

El término sedimentación comprende un grupo de mecanismos de asentamiento de acuerdo al tipo y concentración de sólidos o partículas suspendidas (Arboleda, 2000). En sedimentadores que no están diseñados para procesos anaerobios, la remoción regular del lodo es necesaria para prevenir condiciones sépticas, así como la acumulación y el desprendimiento de gas que pueda obstaculizar el proceso de sedimentación al volver a suspender parte de los sólidos asentados (Tilley *et al.*, 2014). El lodo transportado a la superficie por las burbujas de gas es difícil de remover y puede pasar a la siguiente etapa de tratamiento (Tilley *et al.*, 2014). Dependiendo del diseño del sedimentador, el desenlodado puede realizarse con bomba de mano, suspensión, bomba de vacío o por gravedad, utilizando una salida baja. Si el fondo del tanque está lo suficientemente inclinado, se facilita la remoción de lodo (Tilley *et al.*, 2014).

Los sedimentadores primarios grandes a menudo están equipados con colectores mecánicos que raspan continuamente los sólidos asentados hacia una tolva de lodo en la base del tanque, desde donde se bombea a las instalaciones de tratamiento de lodos (tanques de espesamiento o digestores) (Tilley *et al.*, 2014; CONAGUA 2019). La eliminación frecuente de espuma y su adecuado tratamiento/ disposición final, ya sea con el lodo o por separado, también es muy importante; puede realizarse manualmente o mediante equipos mecánicos de recolección para su tratamiento y disposición adecuada (Tilley *et al.*, 2014; CONAGUA 2019). La colocación de placas o tabiques deflectores, mecanismos distribuidores de la alimentación y mamparas de alimentación, que dispersan la velocidad, pueden dar lugar a una disminución de la canalización y aumento de la eficiencia (Weber, 1972)

Un sedimentador es un tanque que está diseñado para eliminar sólidos suspendidos por sedimentación (**Figura 1a**). También se le llama decantador, tanque de asentamiento o tanque de sedimentación. La baja velocidad del flujo en un sedimentador permite que las partículas sedimentables se desplacen al fondo del tanque, mientras los componentes que pesan menos que el agua flotan hacia la superficie. También pueden servir para el procesamiento de lodos en su forma de espesadores

o clarificación secundaria en el tratamiento de lodos activados. Los tanques de sedimentación primarios son aquellos que reciben aguas residuales crudas, antes del tratamiento biológico, los cuales permiten reducir de manera significativa los sólidos suspendidos (de 50 a 70%) y la materia orgánica (de 20 a 40% de DBO, Demanda Biológica de Oxígeno), garantizando que estos componentes no afecten negativamente los procesos de tratamiento posteriores (Latargere, 2020).

La sedimentación puede presentarse de formas diversas, dependiendo del tipo de partículas y su concentración, el tipo de sedimentador y la zona del tanque donde ocurre este fenómeno, entre otras variables. Los desarenadores se utilizan para remover partículas mayores de 0.2 mm, estas sedimentan de forma independiente sin interacciones entre ellas ni con el fluido que las contiene, las características de los sólidos son partículas discretas y aisladas en solución.

En el caso de los sedimentadores de agua potable con coagulación-floculación previas y decantadores de aguas residuales, a las partículas no disueltas se les agrega un coagulante para que cuando llegue el flujo al tanque sedimentador ya estén aglomeradas, se les llama flóculos o flocs de tamaño adecuado, una vez en este tanque cambia el régimen de flujo de turbulento a flujo laminar, de esta manera los flocs comienzan a descender al fondo del tanque. Este tipo de sedimentador es el que se utiliza en la planta de vista bella y es en el que se enfoca nuestro estudio. Para los sedimentadores y decantadores de flujo ascendente, la mezcla de agua entra por la parte inferior del sedimentador y este asciende a través de unas placas inclinadas que subdividen el espacio en compartimientos, en el que un flujo laminar de partículas no disueltas cae por su propio peso a través de las placas inclinadas y en el fondo de estos tanques se recolectan los lodos formados (Rincón *et al.*, 2014). La compactación de lodos en sedimentadores y en unidades de espesamiento de aguas residuales permite la formación de una masa compactada de partículas en el fondo de las unidades. Las características de los sólidos es que son suspensiones de alta concentración (Lozano *et al.*, 2020).

Los colectores de lodos son cada vez más utilizados en las plantas de tratamientos de agua, ya que representan un medio efectivo de extraer los lodos sin tener que detener la actividad de la planta. Una forma de clasificarlos es por el número de ejes, como los colectores de cuatro ejes, que remueven el lodo en el fondo y en la superficie. Los colectores llamados de tres ejes solo recolectan el lodo sedimentado en el fondo

del tanque. Los recolectores cruzados son utilizados en sedimentadores de mayor tamaño y estos raspan el lodo del fondo del tanque y lo llevan a un depósito. Los recolectores llamados duales recolectan el lodo del fondo a través de un tubo que aspira el lodo y lo lleva a través de una manguera por diferencial de presión a un tanque de lodos (Brentwood, 2022). En este estudio, se realizó la investigación del tanque sedimentador de la planta de vista bella, cuya limpieza es de forma manual e implica la detención de su la operación y el vaciado del tanque.

Metodología

En una primera etapa, se tomaron datos como la dimensión del tanque y el caudal de trabajo. Al mismo tiempo, se realizaron pruebas de laboratorio para conocer la cantidad de solidos suspendidos para determinar el tipo de recolector de lodos más adecuado. Ya que se seleccionó el tipo de recolector de lodos, se procedió a modelarlo, seleccionando resistencia de los materiales tanto al esfuerzo como a la corrosión debido a que este sistema se encontrará sumergido en agua con solidos

suspendidos. Entre los criterios básicos de diseño fue utilizar la especificación AISC, que limita la deflexión causada por una carga a $1/360$ del tramo de la viga (Koo, 1967) y un factor mínimo de seguridad de 12 para cargas dinámicas del tubo de aspiración. También se utilizó la norma ANSI A17.1.1978 para considerar el factor de seguridad del cable de arrastre del carro de aspiración, el cual tendrá una velocidad máxima de desplazamiento de 0.13m/s para que los flocs formados no se rompan (Lozano *et al.*, 2020). Finalmente, se seleccionó el motor que dará el impulso necesario para desplazar el carro aspirador.

Resultados y discusión

La planta consta de 4 trenes de procesos que utilizan el tratamiento de agua superficial convencional. Los procesos que se llevan a cabo, son mezcla rápida o coagulación, mezcla lenta o floculación, sedimentación, filtración y desinfección, los cuales se muestran en la **Figura 1b**. El agua cruda proviene de la Presa de Cointzio y su caudal total esta entre 600 y 640 l/s. El agua tratada tiene alta turbidez, color y olor intensos.

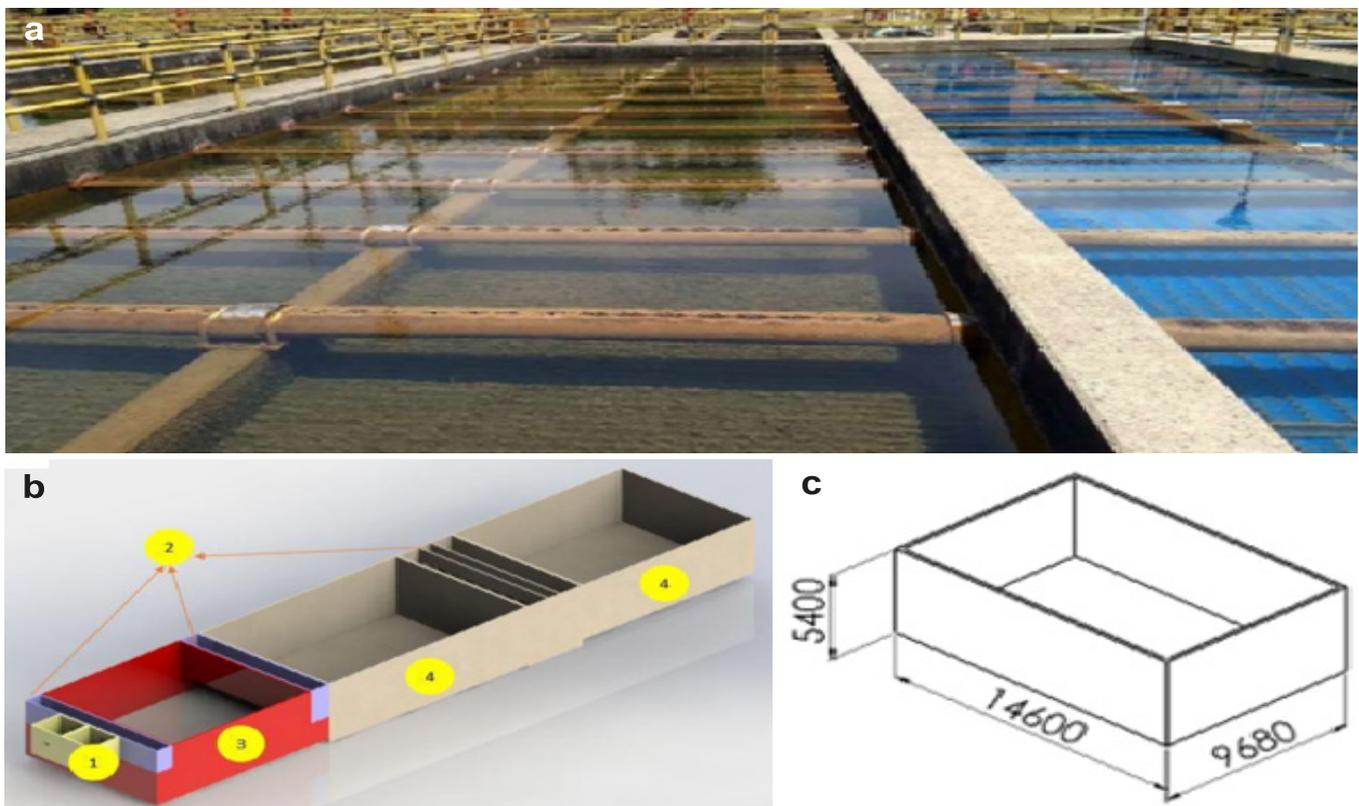


Figura 1. Tratamiento de agua potable, **a)** tanque sedimentador rectangular **b)** tren de procesos de tratamiento de agua y **c)** dimensiones del tanque sedimentador de la planta de Vista Bella.

Las dimensiones del tanque sedimentador se muestran en la **Figura 1c**.

La planta tiene su propio laboratorio, en este se realizó la prueba de jarras que es el método más adecuado para determinar algunos parámetros como la turbiedad, color y cantidad de sólidos suspendidos que se requieren para la selección del recolector de lodos (CONAGUA, 2022).

En las pruebas, se pudo comprobar la cantidad de sólidos suspendidos dentro del agua, durante el mes de julio, cuando se genera la cantidad mayor de agentes contaminantes, por ser época de lluvias. Cabe resaltar, que dicha cantidad varía dependiendo de la época y estación del año. A partir de esto, los resultados de la prueba de jarras se muestran en la **Tabla 1**.

El resultado que nos arroja la prueba A de la jarra 1 fue de 3 ml de lodo por cada litro de agua cruda, en la prueba B, se obtuvo 5 ml de lodo por cada litro de agua cruda. A partir de estos parámetros, se determina si el agua tratada es adecuada para consumo humano, dichos parámetros son entre 0 y 9 ml de lodo por cada litro de agua, cumpliendo con los parámetros nacionales de calidad NOM 127 de la secretaria de salud.

Recomendación del tipo de colector

Para este proyecto, se recomienda utilizar un recolector dual, debido al tamaño y forma del tanque sedimentador, el cual tiene el fondo plano, y la cantidad de lodo sedimentado, ya que las impurezas solo representan el 8% por litro de agua tratada. Este tipo de recolector esta recomendado para impurezas de hasta 10% (Brentwood, 2022). Para cada tanque sedimentador, se propone dos colectores que trabajen en paralelo los cuales tendrían una separación entre ellos y las paredes de aproximadamente 50 centímetros. El recolector solo ocupa la energía eléctrica para que el carro succionador haga el recorrido por el fondo del tanque de lado a lado, la velocidad del carrito debe ser baja para que no perturbe el flujo en el tanque y rompa los flocs formados. La succión del lodo sedimentado se hace debido a la diferencia de

presión que existe entre el fondo, la superficie libre y la descarga, la cual se encontraría debajo de la superficie libre del tanque, este se conecta a una tubería en donde, posteriormente, se le dará tratamiento a la mezcla de lodo.

Diseño y modelado de los componentes

A continuación, se muestra el diseño y modelado de los componentes principales de carrito aspirador, para el modelado se utilizó el software SolidWorks®, este programa fue de gran ayuda para modelar cada uno de los componentes y después realizar el ensamblaje de ellos. El primer componente que se diseñó fue el tubo de aspiración, se tomó en cuenta la manguera de descarga, la corrosión debido al ambiente y la deflexión que podría sufrir debido al su propio peso y las cargas a las cuales estaría sometido. Se decidió utilizar una manguera comercial, ya que es más económica y soporta muy bien el ambiente corrosivo existente, la cual tendría un diámetro interno de 4 pulgadas, por lo que el tubo tiene el mismo diámetro. En el caso del ambiente, sumergido en agua con altos índices de turbiedad y agregados de agentes químicos, se decidió utilizar acero inoxidable 316, el cual tiene como característica una alta resistencia por su contenido de molibdeno. De acuerdo a las cargas sometidas y su propio peso, se realizó el análisis con un tubo comercial de acero inoxidable 316 cédula 40, el cual nos arrojó resultados adecuados de acuerdo a los criterios de diseño utilizados. Las propiedades de este material se muestran en la **Tabla 2**.

A este tubo se le realizarán perforaciones de 1 pulgada de diámetro, cada 188 mm de longitud, que tendrán la función de aspirar el lodo del fondo del tanque. El modelado que se realizó se muestra en la **Figura 2a**, en el que se puede apreciar la brida ANSI B 16.5 que se conecta con la manguera de desagüe de lodo. Para el análisis se consideró únicamente la mitad, ya que va a estar soportado por el centro del tubo y la otra mitad tendría las mismas características, obteniendo resultados comparables de análisis.

Con ayuda del software SkyCiv® se obtuvieron las reacciones, el momento máximo y la deflexión, los resultados se muestran en la **Tabla 3**. Además, se encontró el esfuerzo máximo (**Tabla 3**) con la siguiente ecuación:

Tabla 1. Resultados de sólidos suspendidos en el agua.

Jarra 1		Jarra 2		Jarra 3		Jarra 4	
A	3 ml/l	A	3 ml/l	A	4 ml/l	A	3.5 ml/l
B	5 ml/l	B	5 ml/l	B	5.5 ml/l	B	5.5 ml/l
Suma	8 ml/l	Suma	8 ml/l	Suma	9 ml/l	Suma	9 ml/l

Tabla 2. Tubo sin costura de acero inoxidable 316.

D. nominal (pulg)	D. ext. (mm)	Espesor (mm)	Resistencia a la tracción, (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	M. de elasticidad (GPa)	Porcentaje de Mo (%)
4	114.30	6.02	515	40	193	2

Tabla 3. Reacciones, el momento máximo, la deflexión y otras variables.

Reacciones (kN)	Momento máximo (kN m)	Deflexión (mm)	Relación de extensión de deflexión	Esfuerzo	Factor de diseño
10.31	10.31	1.104	1/905	12.25 MPa	42

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{1031000}{841632} = 12.25 \text{ Mpa} \quad (1)$$

Donde σ es el esfuerzo M es el momento máximo y S es el módulo de la sección.

También se obtuvo el factor de diseño, como se muestra en la **Tabla 3**.

La segunda pieza que se diseñó fue el chasis del carro de aspirador, esta tiene la forma de un canal en C, aquí van ensamblados y/o soldados la mayoría de los componentes, el material es de acero inoxidable 316. A través de esta, se apoya el tubo de aspiración y están conecta-

das las ruedas que transmiten el movimiento lineal sobre un riel. En los extremos se conecta el cable de acero, el cual mueve todo el carro (**Figura 2b**).

El tercer elemento en diseñarse fue la rueda, esta nos sirve para poder dar movilidad al sistema y así recorrer el fondo del tanque sedimentador. Este componente será fabricado con Nylamid Tipo M, un material anticorrosivo, con coeficientes de fricción bajos, y una resistencia a la compresión de 1035 kg/mm². A cada llanta se acoplan dos rodamientos rígidos de bolas de acero inoxidable, cada uno soporta una carga de 8.32 kN, estos transmiten el peso a la llanta y están conectados con el eje (**Figura**

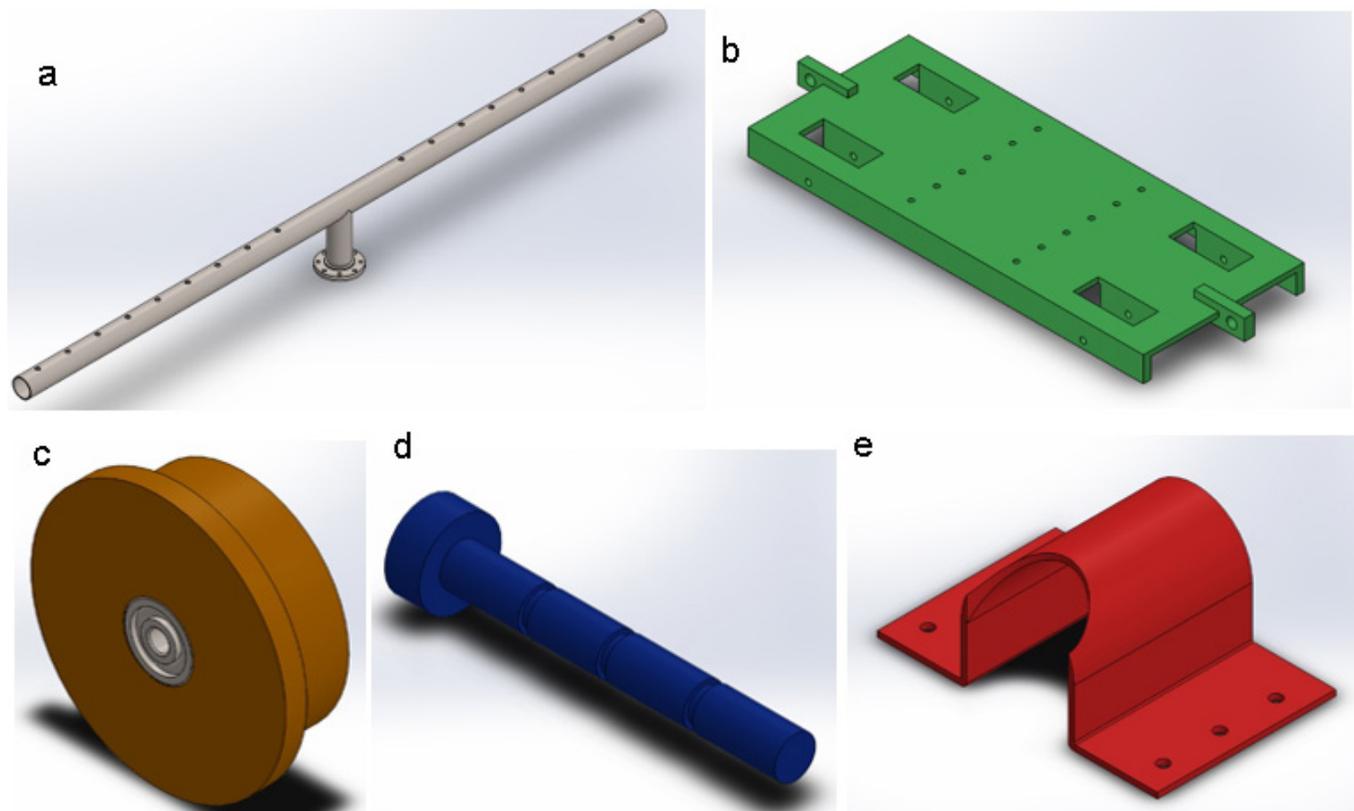


Figura 2. Elementos principales del carro succionador a) tubo de aspiración, b) chasis, c) rueda con rodamiento, d) eje de las llantas y e) chumacera de fijación

2c).

Las ruedas se conectan al chasis mediante un eje y este transmite el peso del carro a las ruedas, está fabricado de acero inoxidable 316, y tiene pequeñas ranuras donde se acoplan los seguros truack para que no exista movimiento axial ni de las ruedas ni del chasis (**Figura 2d**).

Para sujetar el chasis al tubo de aspiración, se diseñó un tipo de chumacera, que se conecta al chasis por medio de 12 pernos de 0.5 in, esta dará rigidez al tubo para que quede fijo durante su movimiento longitudinal, (**Figura 2e**).

El desplazamiento del carro succionador se hará mediante un cable de acero inoxidable 304 para lo cual se determinó la fuerza total que consiste en la fuerza de arrastre del agua más la fuerza de fricción entre las llantas y el riel. A continuación, se muestra el análisis de la determinación de la fuerza de arrastre del tubo de aspiración. Para determinar el coeficiente de arrastre es necesario determinar el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (3)$$

Datos:

$$V=0.13 \text{ m/s}, \mu=1.138 \times 10^{-3}, D=0.1016 \text{ m}, \rho=1000 \text{ kg/m}^3$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, V velocidad de flujo, ρ densidad, A área, D diámetro del tubo y μ es la viscosidad dinámica obteniendo como resultados:

$$Re=11606, C_D=1.2, A=LD=0.4064\text{m}^2, F_D=4.12N$$

Para la fuerza de fricción el peso total del carro se determinó en SolidWorks dando como resultado 1433N, el coeficiente de fricción estático del Nylamid M es de 0.4.

$$F_S = \mu_S F_N = 0.4 * 1433 = 573.22N \quad (4)$$

$$F_D + F_S = 577.34N \quad (5)$$

$$F_{max} = FSF_{perm} = 4041.4N \quad (6)$$

El factor de seguridad utilizado para el cable es de 7.0 que es el de malacates eléctricos.

El esfuerzo permisible es de 1.569 GPa. El diámetro mínimo requerido del cable es:

$$d = \sqrt{\frac{4F_{max}}{\pi\rho_{perm}}} = 1.81mm \quad (7)$$

El diámetro mínimo sugerido debido a la corrosión que no se considera en el factor de seguridad y el acoplamiento con las poleas es de 6.35 mm.

Finalmente, se seleccionó el motorreductor para desplazar el carro succionador, este se conectará por medio del cable de acero, para lo cual se sugiere el motorreductor de corona sinfin, relación 50:1 de 1.50 HP trifásico, con un torque aproximado de 209.9 Nm que es suficiente para desplazar el carro aspirador (soluciones integrales, 2014).

El modelado de ensamblaje proporcionó una guía clara sobre cómo se deben unir las piezas, ayuda a ver que el sistema mecánico se pueda ensamblar correctamente. En la **Figura 3**, se muestra el ensamblaje final del carrito. Al momento de que se elija activar el mecanismo, el motor hará transportar un cable de acero que se conecta al chasis y este comenzará a deslizarse linealmente, así todo el sistema comenzará a hacer el recorrido y aspirar el lodo. El sistema se detendrá hasta que llegue al final del recorrido o hasta que el operario le dé la indicación.

Conclusiones

Este proyecto tuvo como finalidad el sustituir la forma de la limpieza del tanque sedimentador de la planta de Vista Bella que actualmente se hace de forma manual. Se propone que se modifique la recolección de lodos por un medio mecánico y se pueda limpiar diariamente de forma uniforme, sin poner en riesgo a los operarios y alargando los tiempos de vaciado del tanque, lo que contribuiría en un mayor ahorro de agua. Los materiales se eligieron de forma que resistieran la corrosión del ambiente en el que estarán en operación, ya que es muy agresivo por que están sumergidos en agua tratada, el acero inoxidable

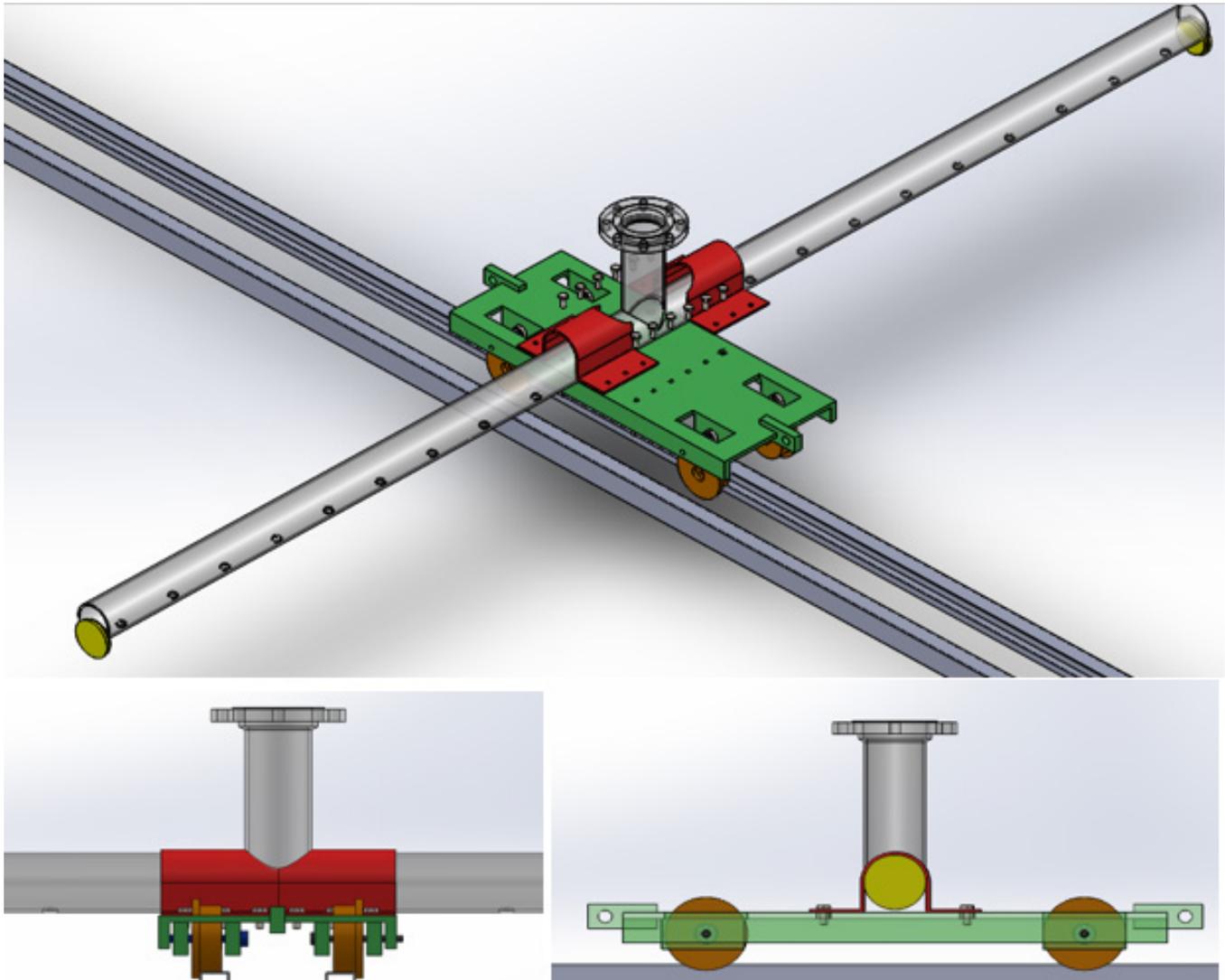


Figura 3. Vista del ensamble del carrito aspirador.

316 y el Nylamid M son suficientes para este ambiente, además en el cálculo de esfuerzos se puede observar que el factor de seguridad de los componentes críticos es adecuado para realizar la operación de aspirado de los sedimentos. De acuerdo a lo anterior, concluimos que el diseño del proyecto es viable para que se construya y se ponga en operación.

Referencias

Rincón A, Herrera OF (2014). Esquema para el dimensionamiento de unidades de sedimentación de alta tasa de flujo ascendente. *Entre Ciencia e Ingeniería* 8(16):29-40.

Arboleda-Valencia J (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá: Mc Graw Hill.

Brentwood (2023). Sistemas de Recolección. <https://es.brentwoodindustries.com/productos/clarificacion/recolectores-de-lodo/sistemas-de-recoleccion/> [consultado el 12 de agosto de 2023].

Comisión Nacional del Agua (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua (2023). Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea. Indicadores de Calidad del Agua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/925192/Generalidades_Indicadores_de_calidad_del_agua.pdf [consultado el 21 de agosto de 2023].

Tilley EA, Ulrich L, Luthi C, Reymond P (2014). Compendium of sanitation systems and technologies. Dübendorf, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and technology (Eawag).

Hazen A (1904). Closure of on sedimentation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE)* 2:87-88.

Koo B (1967). «Procedimiento simplificado para determinar la deflexión máxima de una viga», *Engineering Journal. American Institute of Steel Construction* 4:123-125

Latargere J (2020). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. SSWM <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/sedimentador>

Lozano-Rivas WA (2015). Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio. Universidad Piloto de Colombia.

Soluciones Industriales (2017). Motorreductor Corona Sinfin T-75 rel. 50:1 de 1.50 HP Trifásico Soluciones Industriales. <https://motorreductores.mx/tienda/motorreductor-corona-sinfin-t-75-rel-50-1-de-1-50-hp-trifasico/>

Weber WJ (1972). *Physicochemical processes for water quality control*, ed John Wiley.



Anisotropía en la resistividad eléctrica de tres maderas mexicanas

Anisotropy in the electrical resistivity of three Mexican wood

Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*} , Sonia Correa Jurado¹, Nancy Eloísa Rodríguez Olalde¹, Faustino Ruiz Aquino²

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

²Universidad de la Sierra Juárez

Historial

Manuscrito recibido: 15 de septiembre de 2024

Manuscrito aceptado: 29 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Javier Ramón Sotomayor Castellanos.

javier.sotomayor@umich.mx

ORCID: 0000-0002-1527-8801

Resumen

El objetivo de la investigación fue medir la resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. Se tomaron doce muestras de madera sólida de cada una de las especies y se analizaron para determinar la densidad, el contenido de humedad y la resistencia eléctrica. Las probetas de pequeñas dimensiones fueron sometidas a cuatro tensiones y se determinó su resistividad eléctrica. La magnitud de la resistividad eléctrica varía según la especie y direcciones de anisotropía radial, tangencial y longitudinal. La heterogeneidad y la estructura anatómica de la madera, así como el tipo y la orientación de las solicitaciones aplicadas, explican la variación entre especies y direcciones.

Palabras clave: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, *Quercus scytophylla*, densidad de la madera, heterogeneidad de la madera.

Introducción

La madera es un conductor de masa (*p. ej.* agua) (Rodríguez-Zaccaro y Groover, 2019; Alvarado y Terrazas, 2023), de ondas mecánicas (*p. ej.* sonido) (Bertoldo *et al.*, 2023; Bucur, 2023), así como de fluidos térmicos (*p. ej.* calor) (Chen *et al.*, 2023; Trochonowicz y Szostak, 2023) y de transmisión de corriente eléctrica (*p. ej.* voltaje) (Kirker *et al.*, 2026; Fredriksson *et al.*, 2021). Estos fenómenos de conducción y transporte en la madera están interconectados y se han documentado especie por especie, variable por variable y para temas de investigación específicos. Por consiguiente, los datos experimentales en la literatura incluyen amplias magnitudes y particularidades, lo que dificulta la

Abstract

The objective of the research was to measure the electrical resistivity of the wood of *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, and *Quercus scytophylla*. Twelve solid wood samples were taken from each species and analyzed to determine density, moisture content, and electrical resistance. The small-sized samples were subjected to four electric tensions, and their electrical resistivity was determined. The magnitude of electrical resistivity varies according to the species and the directions of radial, tangential, and longitudinal anisotropy. The heterogeneity and anatomical structure of wood, as well as the type and orientation of the applied stresses, explain the variation between species and directions.

Keywords: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, *Quercus scytophylla*, wood density, wood heterogeneity.

comparación de resultados.

El fenómeno de la transmisión de los protones y electrones a través de un soporte material, en este caso la madera, es considerado erróneamente como un fluido eléctrico (Zelinka *et al.*, 2015; Quintela y Redondo, 2024). El cuerpo de conocimiento sobre este tema de investigación hace referencia especialmente a su correspondencia con el contenido de humedad en la madera (Conde *et al.*, 2021), la detección de biodeterioro (Martin y Günther, 2013), la inspección de árboles (Ganthaler *et al.*, 2019) y sus aplicaciones en la funcionalización de la pared celular (Panzarasa y Burgert, 2022; Łukawski *et al.*, 2023).

Los factores que afectan la medición de la resistencia

eléctrica en la madera son, por una parte, factores intrínsecos. Principalmente su contenido de humedad, la especie, la temperatura, la anisotropía, la composición química, la densidad y la estructura anatómica. De igual manera, las condiciones empíricas que alteran las mediciones son los tipos de electrodos y de la configuración de contacto, la magnitud y duración del voltaje aplicado, así como la forma y dimensiones de la probeta (Hafsa *et al.*, 2019; Baránski *et al.*, 2021; Daouk *et al.* 2021; van Blokland y Adamopoulos, 2022).

Al igual que otras propiedades físico-mecánicas de la madera, su resistividad eléctrica está relacionada con tres de las principales propiedades básicas del material:

- La variabilidad de la madera se refiere a las discrepancias observadas en la magnitud de los parámetros físicos entre especies, árboles y ubicación relativa en cada individuo (Moore y Cown, 2015);
- La heterogeneidad, la cual se manifiesta en la variación en la magnitud de las propiedades físicas en un volumen mínimo representativo de madera, en función de su ubicación relativa en el árbol y/o en el plano leñoso, y en concordancia con las diversas escalas de observación en su estructura jerárquica: El volumen mínimo representativo en una escala macroscópica, el anillo de crecimiento en un nivel meso, y en una escala microscópica, la pared celular y su composición química (Arriaga *et al.*, 2023);
- La anisotropía, una característica que alude igualmente a la variación en la magnitud de sus propiedades físicas, pero esta vez en función de la orientación de medición. Las direcciones radial, tangencial y longitudinal son privilegiadas en relación con el plano leñoso. Esta característica se manifiesta igualmente en las diversas escalas de observación de la organización jerárquica de la madera (Hofstetter y Gamstedt, 2009; Golovin *et al.*, 2022).

Según las diferentes direcciones de observación, la anisotropía de la madera modifica las magnitudes de sus características físicas (Sotomayor *et al.*, 2010; Nursultanov *et al.*, 2020) y mecánicas (Mascia y Lahr, 2006). Para simplificar el análisis, se transforma la geometría referida a los ejes materiales de un volumen elemental de madera (**Figura 1**) en un sistema de coordenadas geométricas en tres direcciones ortogonales: Radial (R), Tangencial (T) y Longitudinal (L).

En el mismo sentido, para caracterizar las propiedades eléctricas de la madera se utiliza la analogía electromecánica entre un sistema de fuerzas mecánicas

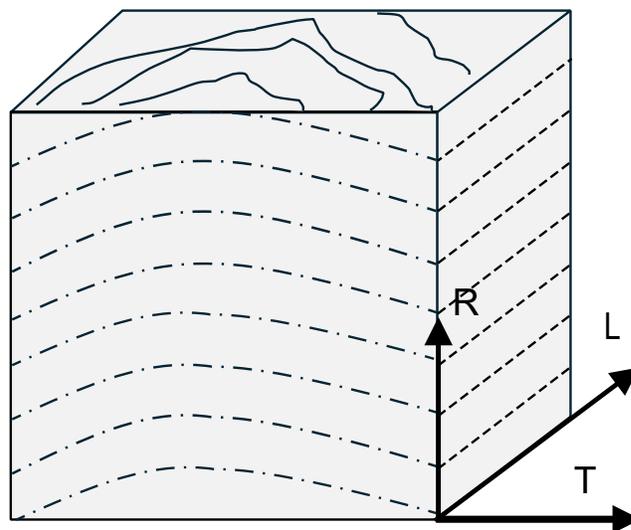


Figura 1. Modelo anisotrópico de un volumen de madera. R = Dirección radial, T = Dirección tangencial, L = Dirección longitudinal.

en equilibrio (Ecuación 1) y un circuito eléctrico elemental (Ecuación 2) (**Figura 2**) (Polocoşer *et al.*, 2017).

La determinación del módulo elástico es el objetivo principal de la caracterización mecánica de la madera. La resistividad es el parámetro de utilidad práctica en la caracterización de las propiedades eléctricas. Se puede determinar la resistencia del circuito aplicando la ley de Ohm (Ecuación 3, Fredriksson *et al.*, 2015) por afinidad entre los dos modelos de la analogía electromecánica (**Figura 2**).

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Donde:

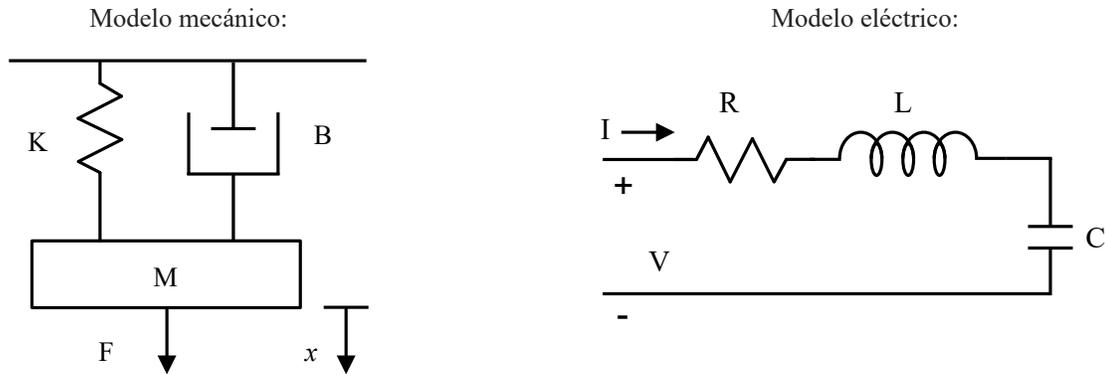
R = Resistencia

V = Voltaje

I = Corriente

La resistencia eléctrica de la madera, también conocida como resistencia eléctrica específica, se mide mediante la resistencia óhmica de una probeta en un área de sección transversal y a una distancia determinada entre los electrodos y/o posiciones de aplicación de voltaje. La resistencia eléctrica de la madera es una propiedad intrínseca del material (Hafsa *et al.*, 2021). Por lo tanto, para su medición, primero debe analizarse su resistencia eléctrica.

Los datos sobre la resistencia eléctrica se han



Ecuación de movimiento:

$$F = M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + B \frac{\partial x}{\partial t} + K x \quad (1)$$

F = Fuerza

K = Constante elástica

B = Coeficiente de amortiguamiento

M = Masa

x = Desplazamiento

Ecuación de malla:

$$V = L \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + R \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{q}{C} \quad (2)$$

V = Voltaje

L = Inductancia

R = Resistencia

C = Capacitancia

q = Carga

I = Corriente con: $\frac{\partial q}{\partial t}$

Figura 2. Analogía electromecánica.

documentado en diversas especies y casos de estudio. Los resultados de este parámetro son específicos para el tamaño de las probetas, el contenido de humedad en la madera y la configuración específica de las probetas porque es de carácter extensivo (Gao *et al.*, 2018). Además, el voltaje utilizado en las pruebas crea incertidumbre adicional en los resultados, situación que implica realizar estudios completos respaldados por análisis estadísticos y controlar las fuentes de variación (Slávik *et al.*, 2019).

El objetivo de esta investigación fue determinar la resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var *pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. y *Quercus scytophylla* Liebm. Para lograr este objetivo, se preparó un experimento completamente homogéneo, al azar y balanceado, y se utilizó un método de laboratorio innovador para caracterizar probetas de pequeñas dimensiones.

Materiales y métodos

Las pruebas de laboratorio modificaron el protocolo experimental reportado por Sotomayor *et al.* (2022). Para la presente investigación se fabricó un dispositivo para sujetar las probetas, se utilizó un aparato más potente

para medir la resistencia eléctrica y se aplicaron cuatro tensiones de prueba (voltajes). El material experimental proviene del mismo lote de madera de los autores citados pero las probetas son diferentes. Así, los resultados aquí presentados son originales e inéditos. Se prepararon doce probetas de madera sólida de cada una de las especies *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Sus dimensiones fueron 20 mm por 20 mm por 20 mm. En lo posible se procuró que sus aristas coincidieran con las direcciones de anisotropía definidas en la **Figura 1**. Las especies en estudio tienen importantes usos actuales y potenciales. Las características tecnológicas de estas maderas están descritas en Rendón *et al.* (2021).

La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento a temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65%, hasta que adquirió un peso constante. La densidad de la madera se determinó con la relación peso/volumen de la probeta al momento del ensayo (International Organization for Standardization, 2014a). Después de las pruebas de resistividad eléctrica, el contenido de humedad de la madera se determinó con la diferencia de pesos al momento del ensayo y en el estado anhidro (International Organization for Standardization, 2014b).

Para realizar las pruebas de resistividad eléctrica, cada probeta se calibró con un cepillo rotativo de 12", marca *Youba Induction Motor* y con potencia de 1,5 H.P. en sus seis caras y luego se posicionó entre los soportes y superficies de contacto del dispositivo, como se muestra en la **Figura 3**.

El dispositivo aplicó presión suficiente para asegurar un flujo estable de corriente directa según la dirección y el acomodo de la probeta. Esto se logró mediante un contacto uniforme entre la madera y las placas de cobre de 0.9 mm de espesor con una resistividad eléctrica de $1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ (**Figura 4**).

Esta configuración asume que la madera es uniforme en toda la probeta, tanto en su estructura física como en su sección transversal. Además, considera que el campo eléctrico y la densidad de corriente son constantes y paralelos a la dirección de medición en todo el volumen de la probeta.

Para cada dirección de anisotropía, se computó la resistencia eléctrica con un medidor de aislamiento marca Fluke, modelo 1560 (Francia). Se aplicaron voltajes de 500, 1000, 2500 y 5000 voltios con una duración de cada prueba de diez segundos. Durante el procedimiento se observó que todas las tensiones de prueba inducían mediciones de resistencia eléctrica repetitivas y estables. La temperatura de la madera durante las pruebas fue de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Temperatura del laboratorio). En cada prueba se realizaron tres mediciones, y con su promedio se calculó la resistividad eléctrica mediante la ecuación 4 (Mastantuoni *et al.*, 2024).



Figura 3. Pruebas de resistividad eléctrica.

$$\rho = R_{CH} \cdot \left(\frac{A}{L} \right) \quad (4)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica ($\Omega \text{ m}$)

R_{CH} = Resistencia eléctrica (Ω)

A = Área transversal a la dirección del flujo eléctrico (m^2)

L = Distancia entre las placas de aplicación del voltaje (m)

En lo subsecuente, al símbolo de la resistividad eléctrica ρ se le asocian los subíndices R, T y L para explicitar que la dirección del flujo eléctrico se midió en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente: ρ_R, ρ_T, ρ_L .

Diseño experimental

Se establecieron tres unidades experimentales (*P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*), calculando la resistividad de cada especie según la ecuación 4 y luego los resultados se agruparon por resistividad radial (R), resistividad tangencial (T) y resistividad longitudinal (L). Cada grupo experimentó cuatro tensiones diferentes: 500, 1000, 2500 y 5000 voltios. Por lo tanto, se formaron 36 muestras, cada una con tres especies, tres direcciones y cuatro tensiones.

Se realizaron pruebas de normalidad de las distribuciones en cada una de las muestras. El criterio de demarcación para considerar una distribución normal fue valores del sesgo estandarizado (SE) y apuntamiento

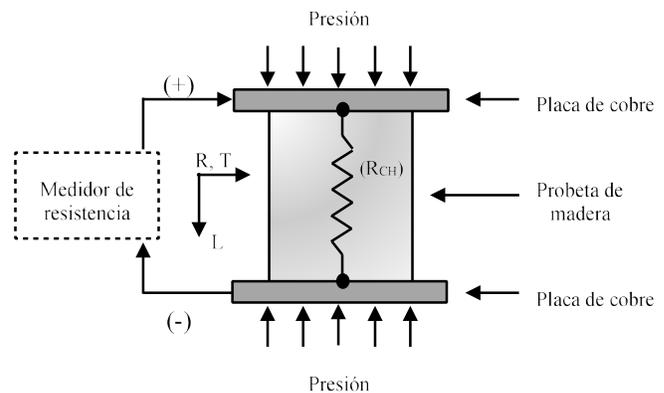


Figura 4. Configuración de las pruebas de resistividad eléctrica. RCH = Resistencia eléctrica; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal (Sotomayor *et al.*, 2022).

estandarizado (AE) al interior del intervalo $[-2, +2]$. Para la densidad (ρ_{CH}) y las resistividades eléctricas se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). El contenido de humedad (CH) es una variable controlada. Se efectuaron pruebas de verificación y análisis de varianza con la hipótesis nula $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ donde σ es la desviación estándar y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas. El criterio de demarcación fueron valores de $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$, para considerar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95% de confianza. Se realizaron pruebas de diferencias de medianas (x) de Kruskal-Wallis (K-W) cuando este criterio no se cumplió. Se utilizaron la hipótesis nula: $H_0: x_1 = x_2$, donde x es la mediana y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas.

Se practicaron pruebas de rangos múltiples (RM) con el criterio de demarcación de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten una misma columna de X .

Resultados y discusión

Los resultados de las pruebas de normalidad indican que las muestras cumplen con el criterio de demarcación para considerar que sus distribuciones son normales (**Tabla 1**). Caso excepcional son las resistividades de *T. rosea* para los voltajes de 500 y 1000 voltios que no satisficieron el criterio de demarcación $[-2 < SE, AE < +2]$ resultado que condujo a realizar pruebas de Kruskal-Wallis. Las pruebas de verificación de varianza muestran que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las desviaciones estándar. Estos resultados permitieron practicar los análisis de varianza entre las resistividades correspondientes a los diferentes voltajes y diferenciar los resultados especie por especie. Un resultado similar se obtuvo de las pruebas de Kruskal-Wallis para las resistividades de *T. rosea* y *Q. scytophylla* para sus direcciones longitudinales. Empero, las resistividades longitudinales de *T. rosea* y *Q. scytophylla* denotan diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$) cuando son determinadas con voltajes diferentes.

Los resultados del análisis de varianza muestran que no hay diferencias significativas entre las resistividades determinadas con diferentes voltajes (**Tabla 1**). Los grupos homogéneos determinados con las pruebas de

rangos múltiples establecen que las resistividades de *T. rosea* se agrupan en voltajes de 500 y 1000 voltios y se distinguen de las determinadas con voltajes de 1000, 2500 y 5000 voltios; igualmente, las resistividades longitudinales de *Q. scytophylla* se agrupan por pares: 500 y 1000 voltios, 1000 y 2500 voltios y 2500 y 5000 voltios. De manera similar, las pruebas de múltiples rangos señalan que, para las direcciones radial y tangencial de las tres especies, las medias de las resistividades se agrupan y no manifiestan diferencias entre ellas, un resultado que se alinea con el análisis de variabilidad. En el mismo sentido, para las direcciones longitudinal de *P. pseudostrobus* sus resultados correspondientes a los cuatro voltajes se agrupan en una sola columna. En otras palabras, no existen diferencias estadísticas entre ellos.

Comparado con *P. pseudostrobus* y *T. rosea*, la madera con mayor densidad de *Q. scytophylla* tiene una resistividad mayor (**Tabla 2; Figura 5**). Los contenidos de humedad de las tres especies son similares entre ellas y varían del 7% al 8%. Las densidades de *P. pseudostrobus* y *T. rosea* son semejantes, así como sus coeficientes de variación CV de 2% (**Tabla 2; Figura 6**). La densidad de *Q. scytophylla*, por otro lado, es 29% mayor que la de las especies anteriores y exhibe un CV igualmente pequeño de 1%. Estos resultados son similares a los reportados por Sotomayor *et al.* (2022) para las mismas especies estudiadas en la presente investigación y exhiben valores aceptables para este parámetro al interior de una misma especie.

Se observan pequeñas variaciones porcentuales entre las resistividades de cada especie, a pesar de que el análisis de varianza indica que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes voltajes (**Tabla 3**). Las direcciones longitudinales de *T. rosea* y *Q. scytophylla* se corresponden con las del análisis estadístico, lo que indica que hay diferencias significativas entre estas muestras. Estos son dos casos distintos. Los coeficientes de variación de la resistividad oscilan entre el 11% y el 45%. Estos valores son relativamente altos para las características físicas de la madera, pero para su resistencia y/o resistividad son similares a los reportados en la bibliografía. Por ejemplo, Gao *et al.* (2018) determinaron la resistencia eléctrica longitudinal de *Populus davidiana* con un coeficiente de variación del 9% ($\rho_{CH} = 350 \text{ kg m}^{-3}$, CH = 10%).

La variación en los valores correspondientes a las re-

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico.

Direcciones de anisotropía	Voltajes (Voltios)	SE [-2, +2]	AE [-2, +2]	Ver-var P _(α = 0.05)	Anova P _(α = 0.05)	K-W P _(α = 0.05)	RM		
<i>Pinus pseudostrobus</i>									
Radial	500	1,132	-0,1488	0,998	0,997		X		
	1000	1,108	-0,1504				X		
	2500	1,133	-0,1144				X		
	5000	1,119	-0,0456				X		
Tangencial	500	1,353	-0,2571	0,985	0,996		X		
	1000	1,608	0,2759				X		
	2500	1,498	0,0912				X		
	5000	1,611	0,3045				X		
Longitudinal	500	1,031	-0,3537	0,996	0,690		X		
	1000	0,994	-0,3491				X		
	2500	1,137	-0,1105				X		
	5000	1,039	-0,2183				X		
<i>Tabebuia rosea</i>									
Radial	500	-0,405	-0,238	0,993	0,506		X		
	1000	-0,703	-0,101				X		
	2500	-1,112	-0,411				X		
	5000	-0,922	-0,829				X		
Tangencial	500	2,450	3,522	0,969	0,883		X		
	1000	2,267	3,224				X		
	2500	1,022	1,308				X		
	5000	-0,321	-0,284				X		
Longitudinal	500	0,521	-0,506	0,329	0,020*	0,765	X		
	1000	0,608	-0,168				X	X	
	2500	-0,106	-0,339					X	
	5000	-0,493	-0,393					X	
<i>Quercus scytophylla</i>									
Radial	500	0,275	-0,670	0,992	0,424		X		
	1000	0,402	-0,803				X		
	2500	0,380	-0,448				X		
	5000	0,335	-0,248				X		
Tangencial	500	0,431	-0,919	0,934	0,845		X		
	1000	0,369	-0,911				X		
	2500	0,361	-0,921				X		
	5000	0,455	-0,840				X		
Longitudinal	500	1,659	0,792	0,204	0,005*		X		
	1000	1,533	0,538				X	X	
	2500	1,438	-0,066					X	X
	5000	1,550	-0,326						X

SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; K-W = Kruskal-Wallis; RM = Rangos múltiples; * P_(α = 0,05) < 0,05: Sí existe diferencia estadísticamente significativa.

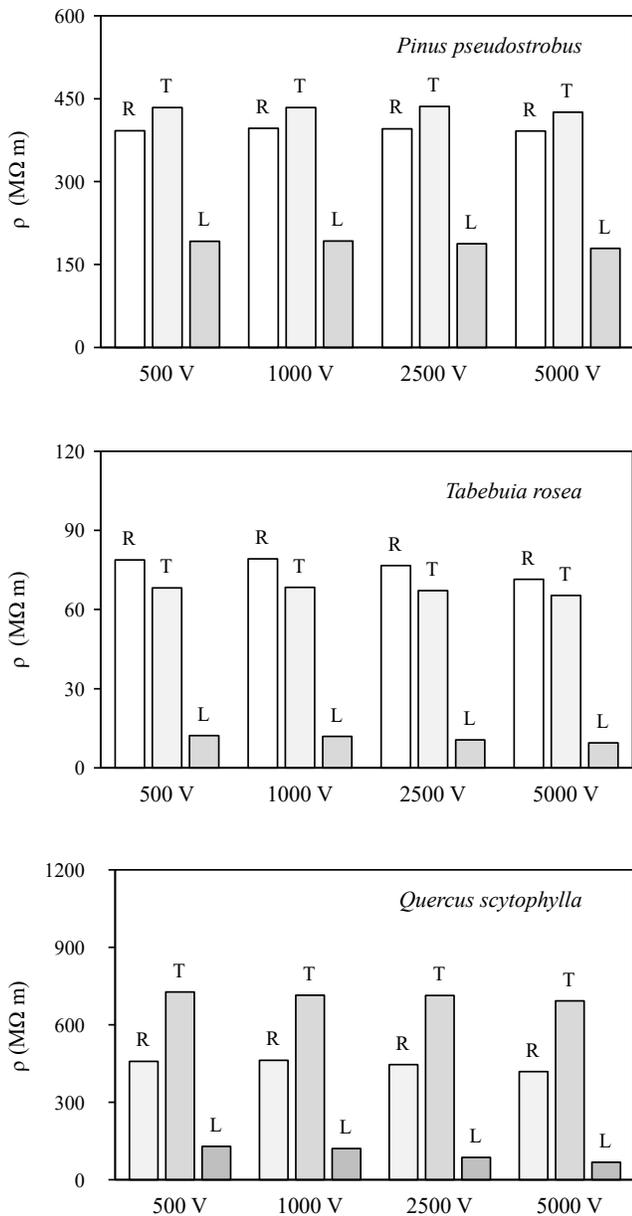


Figura 5. Comparativos de la resistividad eléctrica (ρ) en función del voltaje (V) para las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L). Preparados con datos de la **Tabla 2**.

sistividades puede ser atribuida a los factores siguientes:

- La diversidad en la estructura anatómica de las especies: los diferentes componentes estructurales del plano leñoso variaron en tamaño, forma y ubicación. La corriente eléctrica recorrió el volumen de la madera en condiciones desiguales según el tipo y la orientación relativa de cada elemento anatómico de cada especie.
- Heterogeneidad de la madera: las probetas eran pequeñas y su estructura anatómica puede considerarse

Tabla 2. Resultados de la densidad, del contenido de humedad, de la resistividad eléctrica y de los voltajes.

		Densidad	Voltajes			
			500 V	1000 V	2500 V	5000 V
Direcciones de anisotropía		ρ_{CH}	ρ	ρ	ρ	ρ
Contenidos de humedad (CH)		(kg m^{-3})	($\text{M}\Omega \text{ m}$)			
<i>Pinus pseudostrubus</i>						
Radial CH = 8%	μ	552	392	397	395	391
	σ	13	87	88	86	84
	CV	(2)	(22)	(22)	(22)	(21)
Tangencial CH = 8%	μ	-	434	434	436	426
	σ	-	118	112	116	115
	CV	-	(27)	(26)	(27)	(27)
Longitudinal CH = 8%	μ	-	192	192	187	179
	σ	-	31	31	30	29
	CV	-	(16)	(16)	(16)	(16)
<i>Tabebuia rosea</i>						
Radial CH = 7%	μ	555	79	79	77	71
	σ	8	15	15	14	12
	CV	(2)	(19)	(19)	(18)	(17)
Tangencial CH = 7%	μ	-	68	68	67	65
	σ	-	11	11	9	7
	CV	-	(17)	(16)	(13)	(11)
Longitudinal CH = 7%	μ	-	12	12	11	9
	σ	-	3	2	2	2
	CV	-	(21)	(21)	(18)	(17)
<i>Quercus scytophylla</i>						
Radial CH = 7%	μ	716	459	463	446	419
	σ	8	75	69	69	70
	CV	(1)	(16)	(15)	(16)	(17)
Tangencial CH = 7%	μ	-	727	715	714	692
	σ	-	103	99	95	86
	CV	-	(14)	(14)	(13)	(12)
Longitudinal CH = 7%	μ	-	129	121	87	68
	σ	-	59	53	33	27
	CV	-	(45)	(44)	(38)	(40)

ρ_{CH} = Densidad; CH = Contenido de humedad; ρ = Resistividad eléctrica; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento y entre paréntesis.

homogénea macroscópicamente. Sin embargo, en una escala microscópica, el arreglo de las células y/o los tejidos de crecimiento no uniformes y/o no continuos

Tabla 3. Diferencias porcentuales entre las resistividades eléctricas según los voltajes aplicados.

Direcciones de anisotropía	Voltajes % (1000/500)	Voltajes % (2500/500)	Voltajes % (5000/500)
<i>Pinus pseudostrobus</i>			
Radial	0	0	-2
Tangencial	0	0	-2
Longitudinal	0	-3	-7
<i>Tabebuia rosea</i>			
Radial	1	-3	-9
Tangencial	-2	-2	-5
Longitudinal	-7	-33	-47
<i>Quercus scytophylla</i>			
Radial	1	-3	-9
Tangencial	0	-1	-4
Longitudinal	-3	-13	-23

alteró el flujo de la corriente eléctrica localmente.

- Tipo de sollicitación: se evaluaron las resistencias en una configuración básica y se compararon cuatro voltajes. En la literatura se reportan procedimientos sofisticados en los cuales factores intrínsecos a la madera y a las condiciones de ensayo provocan una variación aparente, en comparación con la resistividad determinada con una sollicitación simple.
- La orientación de la sollicitación: las probetas se recortaron y alinearon en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, que son direcciones privilegiadas estructuralmente donde la anisotropía de la madera es fundamental. Sin embargo, no se puede afirmar que las direcciones de anisotropía estén alineadas con la combinación y acomodo de los diferentes tipos de células en la madera, ni con los anillos de crecimiento.

El protocolo experimental implementó un control riguroso de los factores que pudieran influir en las mediciones con el objetivo de minimizar la variación en las magnitudes de las resistencias y compararlas de acuerdo con sus direcciones de anisotropía.

La **Tabla 4** muestra las anisotropías entre direcciones longitudinal y tangencial, longitudinal y tangencial y longitudinal/longitudinal, las últimas calculadas como referencia. Para *P. pseudostrobus* las anisotropías de la resistividad promedio entre las direcciones radial y

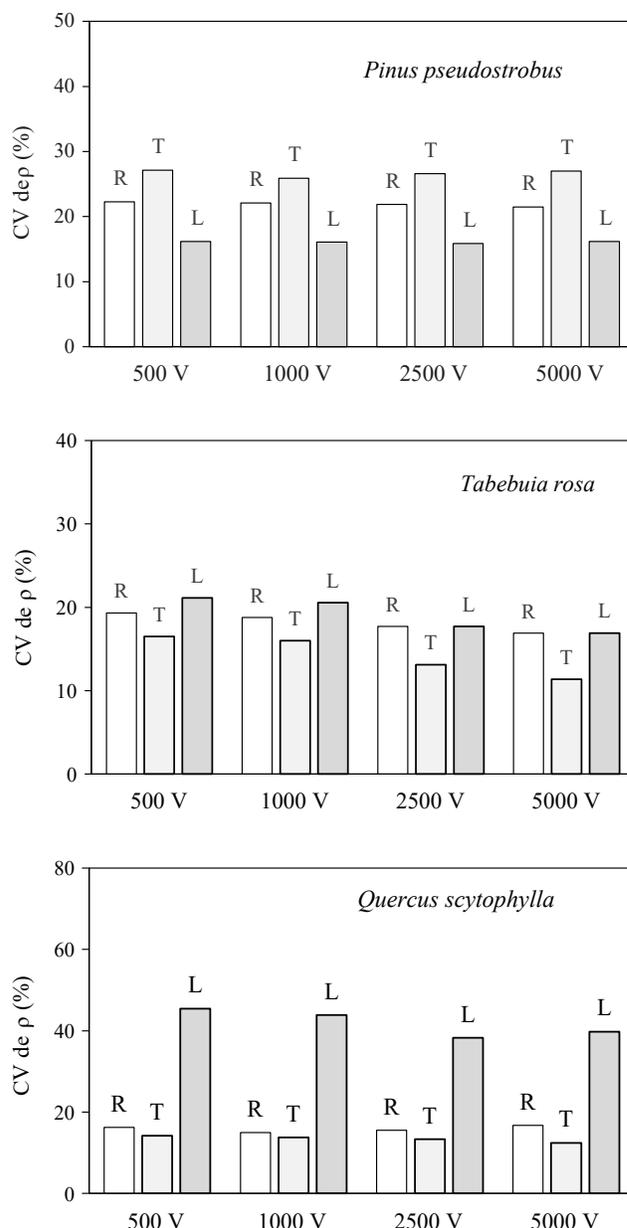


Figura 6. Comparativos del coeficiente de variación (CV) de la resistividad eléctrica (ρ) en función del voltaje (V) para las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L). Preparados con datos de la Tabla 2.

tangencial respecto a la longitudinal (ρ_R / ρ_L y ρ_T / ρ_L) van de 2,10 a 2,30. Estas magnitudes aumentan para *T. rosea* y *Q. scytophylla* y fluctúan de 4,67 a 7,48. Respecto al voltaje aplicado, los promedios de las anisotropías correspondientes a 500 y 1000 voltios se varían de 4,24 a 4,40. En cambio, para voltajes de 2500 y 5000 voltios fluctúan entre 5,20 y 5,89.

Existe evidencia empírica de que las características de la estructura anatómica de la madera controlan las

Tabla 4. Relaciones de anisotropía de las resistividades eléctricas.

Anisotropías	Voltaje	Voltaje	Voltaje	Voltaje	Promedios de direcciones R, T, L.
	500	1000	2500	5000	
<i>Pinus pseudostrabus</i>					
ρ_L/ρ_L (Referencia)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ρ_R/ρ_L	2,04	2,06	2,11	2,18	2,10
ρ_T/ρ_L	2,26	2,26	2,33	2,37	2,30
<i>Tabebuia rosea</i>					
ρ_L/ρ_L (Referencia)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ρ_R/ρ_L	6,41	6,63	7,18	7,53	6,94
ρ_T/ρ_L	5,55	5,72	6,29	6,89	6,11
<i>Quercus scytophylla</i>					
ρ_L/ρ_L (Referencia)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ρ_R/ρ_L	3,55	3,84	5,12	6,16	4,67
ρ_T/ρ_L	5,62	5,92	8,19	10,18	7,48
Promedios de voltajes	4,24	4,40	5,20	5,89	4,93

ρ_R = Resistividad radial; ρ_T = Resistividad tangencial; ρ_L = Resistividad longitudinal.

propiedades físicas y mecánicas (Toong *et al.*, 2014). A manera de síntesis de los modelos de la estructura celular de la madera y su aplicación en analogías con una malla de resistencia eléctrica (Jiang *et al.*, 2003; Zelinka *et al.*, 2007; Žigon *et al.*, 2021; Tran *et al.*, 2022; Tran *et al.*, 2023), la **Figura 7** presenta las secciones transversales de madera del plano transversal (tangencial-radial) de la madera gimnosperma de *Cryptomeria japonica* y angiosperma *Fagus crenata* (Banco de características tecnológicas de maderas mexicanas del Laboratorio

de Mecánica de la Madera, FITECMA). La madera gimnosperma presenta una clara diferencia entre los tejidos de madera tardía y temprana a nivel micro anatómico (**Figura 7a**). Por su parte, en la especie angiosperma se distinguen los acomodados y dimensiones de las células en una escala meso anatómica organizadas en capas (**Figura 7b**).

Para argumentar el efecto de la estructura anatómica de la madera en su anisotropía de las magnitudes de la resistividad eléctrica, se propone el modelo simplificado

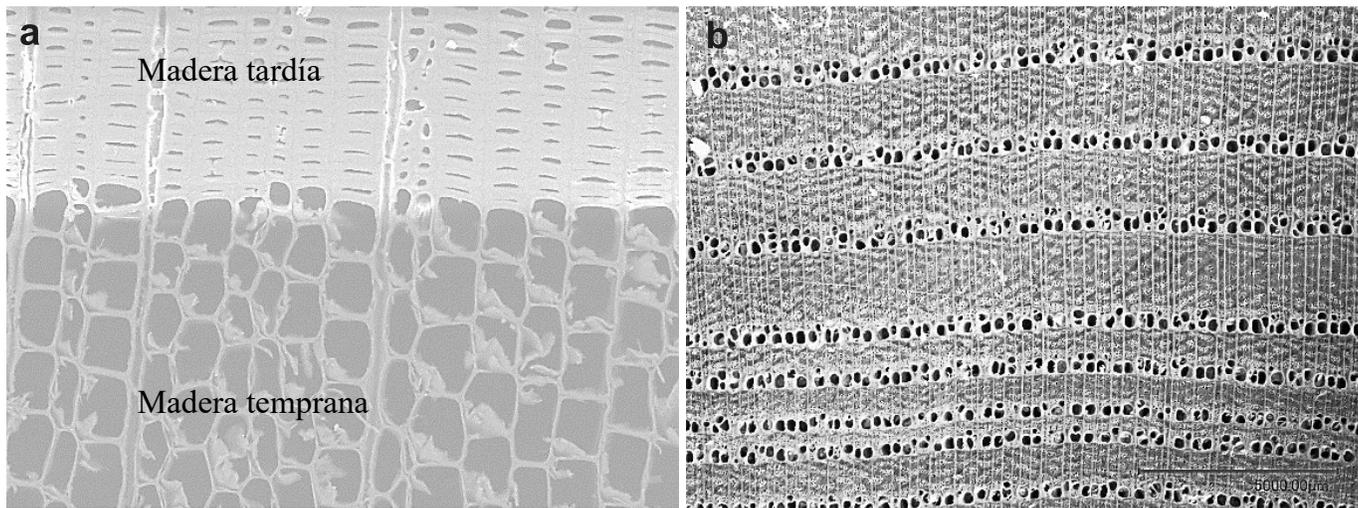


Figura 7. Secciones transversales de madera. a) Sección microscópica del plano transversal (tangencial-radial) de la madera de *Cryptomeria japonica*. Amplificación 400 veces. b) Sección mesoscópica del plano transversal (tangencial-radial) de la madera de *Fagus crenata*. Amplificación 200 veces.

de la estructura celular en el plano tangencial-radial (**Figura 8**) y en el plano tangencial-longitudinal (**Figura 9**). Desde otra escala de observación meso anatómica, el modelo estructural del plano tangencial-radial representa la corriente eléctrica fluyendo en las direcciones tangencial y/o radial (**Figura 10**) a través de dos capas de crecimiento anual de la madera.

La madera es una sustancia aislante, es decir es un material que resiste al movimiento de la carga eléctrica. Los electrones de valencia de los aislantes, como la madera, están fuertemente restringidos y no pueden moverse libremente por su estructura. El mecanismo de conducción eléctrica en la madera depende de la presencia de iones, como portadores de carga en la pared celular, y de las propiedades de porosidad del plano leñoso, lo que resulta en un mecanismo de percolación a través del cual se produce el movimiento de iones (Zelinka *et al.*, 2015; Fredriksson *et al.*, 2021). Así, la estructura anatómica (Jiang *et al.*, 2003) y su composición química (Jakes *et al.*, 2013) juegan igualmente un papel importante en los fenómenos de transferencia del flujo eléctrico.

El flujo de la corriente eléctrica a través de la madera se idealiza transitando a través de tres microestructuras: En el plano transversal, es decir en las direcciones radial

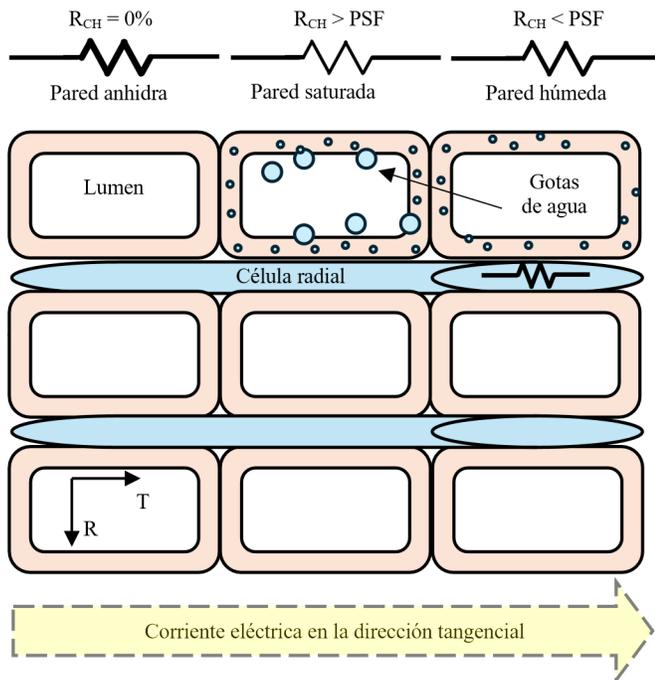


Figura 8. Modelo de la microestructura celular de la madera en el plano tangencial-radial. R_{CH} = Resistencia eléctrica, CH = Contenido de humedad, PSF = Punto de saturación de la fibra ($CH > 30\%$), R = Dirección radial, T = Dirección tangencial.

y/o tangencial, la corriente eléctrica utiliza las paredes celulares como medio para desplazar iones. En el caso de especies angiospermas estas células se asemejan a las traqueidas y en el caso de las gimnospermas son los elementos de vaso. Por otra parte, la corriente eléctrica fluye a través de las células acomodadas en la dirección longitudinal, definidas de esta manera porque su dimensión más larga es paralela al eje principal de crecimiento del árbol. Como tercera estructura se definen los espacios intercelulares y de los lúmenes que también intervienen en el modelo.

En la dirección longitudinal la corriente eléctrica se desplaza a lo largo de las células longitudinales y transversalmente a las radiales. En cambio, en la dirección tangencial y/o radial, la corriente se desplaza transversalmente a través de las paredes celulares longitudinales, pero a lo largo de las células radiales.

Estas tres microestructuras pueden estar vacíos, contener microgotas y/o vapor de agua correspondientes con tres estados de humedad de la madera: seco ($CH \approx 0\%$), húmedo ($0\% < CH < PSF$) y/o saturado ($CH > PSF$). De tal forma que la resistencia de cada parte de una célula y/o lumen varía enormemente al momento de su medición. Aunado a esto, se considera la composición química y otros constituyentes de cada tipo de microestructura los cuales son particulares para cada especie.

Como resultado, cada probeta observada tiene una densidad particular dependiendo de la cantidad de masa de materia lignocelulósica que contenga respecto a los espacios vacíos. Además, la magnitud en las mediciones de la resistencia eléctrica variará por el efecto del

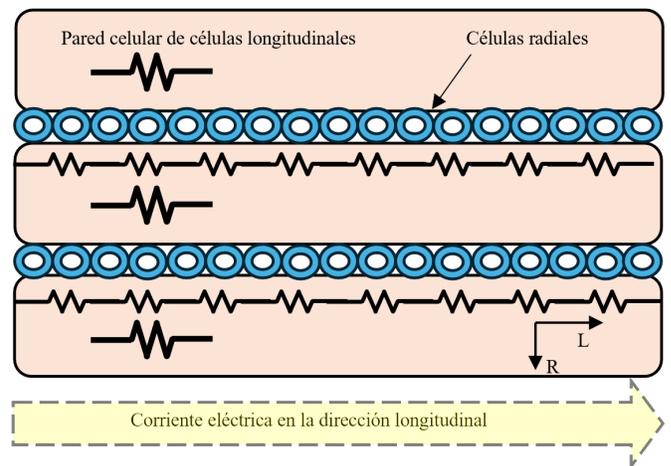


Figura 9. Modelo de la microestructura celular de la madera en el plano tangencial-longitudinal.

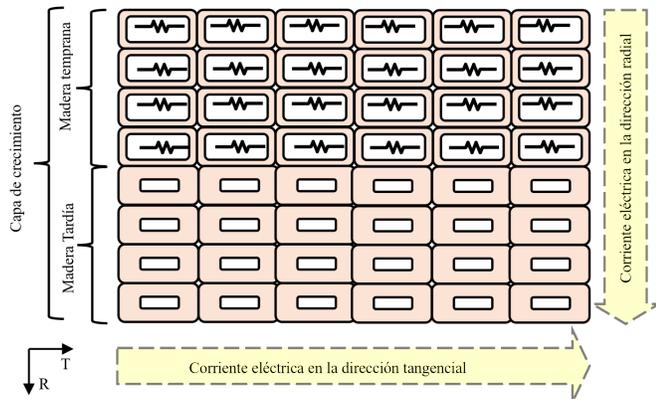


Figura 10. Modelo de una capa de crecimiento anual de la madera en el plano tangencial-radial.

contenido de humedad presente en la madera. De tal forma, que cada uno de estos componentes anatómicos tiene una resistencia propia R_{CH} resultado se su composición material combinada con la humedad. La combinación de diferentes tipos, tamaños y acomodos de las células de la estructura anatómica de la madera resulta en una amplia variabilidad de estructuras por modelar, proponer analogías y aplicar la teoría de mallas eléctricas.

Cada célula es considerada un resistor que controla el flujo de corriente eléctrica dependiente de sus características propias y de su contenido de humedad y de la orientación en el plano leñoso. Cada célula se idealiza como una resistencia funcionando en serie y/o en paralelo (**Figura 11**). Al agrupar células y tejidos leñosos en una unidad de volumen de la madera, es decir en la probeta, se crea por analogía, un resistor con una resistencia específica o resistividad volumétrica equivalente a la resistencia en el modelo eléctrico

propuesto en la **Figura 2** y utilizada en la Ecuación 4. En el contexto del modelo propuesto en la presente investigación, la resistividad eléctrica de la madera varía según la especie, el contenido de humedad de la madera y sus direcciones de anisotropía.

La heterogeneidad en las cuantificaciones de resistencias eléctricas, atribuible a la estructura anatómica de las diversas especies examinadas, se justifica a través de las consideraciones previamente mencionadas. Estas discrepancias se manifiestan tanto dentro como entre especies. No obstante, cabe destacar que las evaluaciones estadísticas de normalidad y verificación de varianza indican que las muestras de las tres especies son homogéneas y distribuidas de manera uniforme (**Tabla 1**). Sin embargo, los coeficientes de variación son elevados en comparación con otras características físicas de la madera (Sotomayor, 2015).

Adicionalmente, como elementos que influyen en la fluctuación de los valores de resistividad eléctrica, en el presente estudio se deben considerar la densidad de cada madera, su contenido de humedad durante las pruebas y el voltaje aplicado. En madera seca que contiene hasta el 7% de contenido de humedad, la disminución de la resistividad eléctrica es aproximadamente cinco veces mayor para un incremento del 1% de humedad. Desde el 7% hasta el punto de saturación de la fibra, la variación de la resistividad se incrementa de dos a cuatro veces por cada incremento del 1% en el contenido de humedad (Baránski *et al.*, 2021).

Esta información podría proporcionar una explicación para las discrepancias entre los valores para las mismas especies reportados en Sotomayor *et al.* (2022) y los de

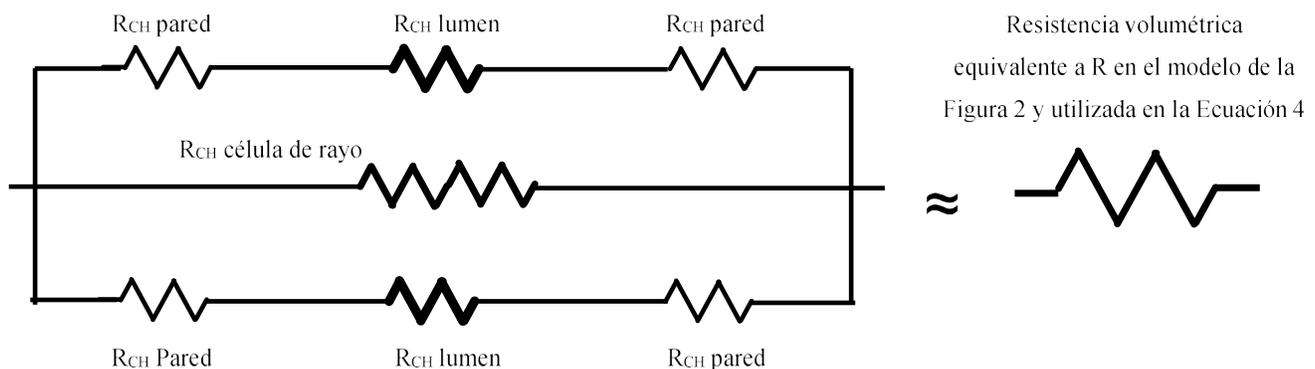


Figura 11. Analogía de la estructura anatómica de las figuras 6, 7, 8 y 9 con una red de resistencias eléctricas y su resistencia volumétrica (R). R_{CH} = Resistencia eléctrica.

la presente investigación. Los autores mencionados que trabajaron con especies similares reportan los siguientes contenidos de humedad: *P. pseudostrobus* 13%, *T. rosea* 11% y *Q. cytophylla* 15%. Por el contrario, los contenidos de humedad en la presente investigación fueron, respectivamente: *P. pseudostrobus* 8%, *T. rosea* 7% y *Q. cytophylla* 7%. Las discrepancias en términos de humedad son superiores a las observadas en el presente estudio. Por lo tanto, las magnitudes de los resultados detallados en la **Tabla 2** superan 8% en promedio a los de la investigación mencionada.

Conclusiones

La resistividad eléctrica de las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. cytophylla* puede ser evaluada mediante la utilización de muestras de dimensiones reducidas, aplicando voltajes de 500, 1000, 2500 y 5000 voltios. La resistividad eléctrica constituye una propiedad inherente de la madera y su magnitud fluctúa en función de la especie. Este parámetro manifiesta una anisotropía en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera. Es recomendable establecer los valores de las resistividades eléctricas entre especies mediante métodos de prueba equivalentes y/o normalizados. Los hallazgos deben incorporar datos relativos a la densidad de la madera y su nivel de humedad.

La utilización de elementos de madera orientados en las direcciones de anisotropía radial, tangencial y longitudinal resulta inusual en el ejercicio de la Ingeniería en Tecnología de la Madera. En consecuencia, es esencial considerar que las resistividades aquí expuestas aluden a condiciones ideales de determinación, y el parámetro a tomar en cuenta se determinará con base en la función que la pieza de madera desempeñará en un proyecto concreto de diseño o producción de productos de valor añadido.

Agradecimientos

La investigación fue financiada por el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán (Proyecto ICTI-PICIR23-153) y por la Coordinación de la Investigación Científica (Programa de Investigación CIC-UMSNH 2024-2025) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Referencias

- Alvarado MV, Terrazas T (2023). Tree species differ in plant economic spectrum traits in the tropical dry forest of Mexico. *PLoS ONE* 18(11):e0293430. doi:10.1371/journal.pone.0293430.
- Arriaga F, Wang X, Íñiguez-González G, Llana DF, Esteban M, Niemz P (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests* 14:1202. doi:10.3390/f14061202.
- Barański J, Suchta A, Barańska S, Klement I, Vilkovská T, Vilkovský P (2021). Wood moisture-content measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood. *Sensors* 21:7033. doi:10.3390/s21217033.
- Bertoldo C, Pereira GA, Gonçalves R (2023). Effect of reducing the size and number of faces of polyhedral specimen on wood characterization by ultrasound. *Materials* 16:4870. doi:10.3390/ma16134870.
- Bucur V (2023). A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. *Forests* 14:1545. doi:10.3390/f14081545.
- Chen Y-H., Ho S-T., Lin H-C. (2023). Evaluation of physico-mechanical properties and thermal conduction to energy-saving effects of wood compression layered structural materials. *Polymers* 15:3208. doi:10.3390/polym15153208.
- Conde-García M, Conde-García M, Fernández-Golfín JJ (2021). Improving the accuracy of wood moisture content estimation in four European softwoods from Spain. *Forest Systems* 30(1):e002. doi:10.5424/fs/2021301-17798.
- Daouk B, Baldwin C, and Cruickshank CA (2021). Determining the impact of sensor orientation on moisture content measurements in eastern white pine. *Journal of Physics: Conference Series* 2069:012047. doi:10.1088/1742-6596/2069/1/012047.
- Fredriksson M, Claesson J, Wadsö L (2015). The influence of specimen size and distance to a surface on resistive moisture content measurements in wood. *Mathematical Problems in Engineering* 215758:1-7. doi:10.1155/2015/215758.
- Fredriksson M, Thybring EE, Zelinka SL (2021). Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions. *Holzforschung*, 75(6):517-525. doi:10.1515/hf-2020-0138.
- Ganthaler A, Sailer J, Bär A, Losso A, Mayr S (2019). Noninvasive analysis of tree stems by electrical resistivity tomography: unraveling the effects of temperature, water status, and electrode installation. *Frontiers in Plant Science* 10:1455. doi:10.3389/fpls.2019.01455.

- Gao S, Bao Z, Wang L, Yue X (2018). Comparison of voltammetry and digital bridge methods for electrical resistance measurements in wood. *Computers and Electronics in Agriculture* 145:161-168. doi:10.1016/j.compag.2017.11.004.
- Golovin YI, Gusev AA, Golovin DY, Matveev SM, Vasyukova IA (2022). Multiscale mechanical performance of wood: from nano- to macro-scale across structure hierarchy and size effects. *Nanomaterials* 12:1139. doi:10.3390/nano12071139.
- Hafsa W, Angellier N, Takarli M, Pop O (2021). A mixed experimental-numerical electrical resistivity-based method for moisture content assessment in wood tested using the example of Douglas fir. *Wood Science and Technology* 55(4):697-718. doi:10.1007/s00226-021-01281-x.
- Hafsa W, Angellier N, Takarli M, Pop. O. (2019). Monitoring of timber structures: moisture content evaluation by using electrical resistivity method. In: *5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Guimarães, Portugal. pp. 659-670. <https://amu.hal.science/hal-04059350>.
- Hofstetter K, Gamstedt EK (2009). Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review. *Holzforschung* 63:130-138. doi:10.1515/HF.2009.018.
- International Organization for Standardization (2014a). ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- International Organization for Standardization (2014b). ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/60064.html>.
- Jakes JE, Plaza N, Stone DS, Hunt CG, Glass SV, Zelinka SL (2013). Mechanism of transport through wood cell wall polymers. *Journal of Forest Products and Industries* 2(6):1013. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2013/fpl_2013_jakes002.pdf.
- Jiang ZH, Chen Z, Fen BH, Hou Z. Q., Chen GH (2003). Modeling oven-dry softwood resistivity based on the resistor network theory. *Holzforschung* 57(4):415-420. doi:10.1515/HF.2003.061.
- Kirker GT, Bishell AB, Zelinka SL (2016). Electrical properties of wood colonized by *Gloeophyllum trabeum*. *International Biodeterioration and Biodegradation* 114:110e115. doi:10.1016/j.ibiod.2016.06.004
- Łukawski D, Hochmańska-Kaniewska P, Janiszewska-Latterini D, Lekawa-Raus A (2023). Functional materials based on wood, carbon nanotubes, and graphene: manufacturing, applications, and green perspectives. *Wood Science and Technology* 57:989-1037. doi:10.1007/s00226-023-01484-4.
- Martin T (2012). Complex resistivity measurements on oak. *European Journal of Wood and Wood Products* 70:45-53. doi:10.1007/s00107-010-0493-z.
- Martin T, Günther T (2013). Complex Resistivity Tomography (CRT) for fungus detection on standing oak trees. *European Journal of Forest Research* 132(5-6):765-776. doi:10.1007/s10342-013-0711-4.
- Mascia NT, Lahr FA R. (2006). Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. *Materials Research* 9(3):301-310. doi:10.1590/S1516-14392006000300010.
- Mastantuoni GG, Tran VC, Garemark J, Dreimol CH, Engquist I, Berglund LA, Zhou Q (2024). Rationally designed conductive wood with mechanoresponsive electrical resistance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 178:107970. doi:10.1016/j.compositesa.2023.107970.
- Moore J, Cown D (2015). Wood quality variability – what is it, what are the consequences and what we can do about it? *New Zealand Journal of Forestry* 59(4):3-9.
- Nursultanov N, Heffernan WJ B., Altaner C, Pang S (2020). Anisotropic electrical conductivity of green timber within 20-90 °C temperature range. *Wood Science and Technology* 54:1181-1196. doi:10.1007/s00226-020-01212-2.
- Panzarasa G, and Burgert I (2022). Designing functional wood materials for novel engineering applications. *Holzforschung* 76(2):211-222. doi:10.1515/hf-2021-0125.
- Polocoşer T, Kasal B, Stöcke F (2017). State-of-the-art: intermediate and high strain rate testing of solid wood. *Wood Science and Technology* 51:1479-1534. doi:10.1007/s00226-017-0925-6.
- Quintela FR, Redondo Melchor RC (2024). Diccionario de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Salamanca. <https://electricidad.usal.es/Diccionario>.
- Rendón Correa A, Dorantes Hernández F, Mejía Valencia S, Alamilla Fonseca LN (2021). Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas en México. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/15522.pdf>.
- Rodriguez-Zaccaro FD, Groover A (2019). Wood and water: How trees modify wood development to cope with drought.

- Plants Peoples Planet PPP* 1(4):346-355. doi:10.1002/ppp3.29.
- Slávik R, Čekon M, Štefaňák J (2019). A nondestructive indirect approach to long-term wood moisture monitoring based on electrical methods. *Materials* 12:2373. doi:10.3390/ma12152373.
- Sotomayor Castellanos JR (2015). Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Morelia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. doi:10.13140/RG.2.1.3497.4884.
- Sotomayor Castellanos JR, García Mariscal JL, Moya Lara CE, Olguín Cerón JB (2010). Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. *Investigación e Ingeniería de la Madera* 6(3):3-32.
- Sotomayor Castellanos JR, Macedo Alquicira I, Mendoza González E (2022). Resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. *INNOTEC* e621. doi:10.26461/24.07.
- Toong W, Ratnasingam J, Roslan MKM, Halis R (2014). The prediction of wood properties from anatomical characteristics: The case of common commercial Malaysian timbers. *BioResources* 9(3):5184-5197. doi:10.15376/biores.9.3.5184-5197.
- Tran VC, Mastantuoni GG, Belaineh D, Aminzadeh S, Berglund LA, Berggren M, Zhou Q, Engquist I (2022). Utilizing native lignin as redox-active material in conductive wood for electronic and energy storage applications. *Journal of Materials Chemistry A* 10:15677-15688. doi:10.1039/D1TA10366K.
- Tran VC, Mastantuoni GG, Zabhipour M, Li L, Berglund L, Berggren M, Zhou Q, Engquist I (2023). Electrical current modulation in wood electrochemical transistor. *PNAS* 120(18):e2218380120. doi:10.1073/pnas.2218380120.
- Trochonowicz M, Szostak B (2023). The impact of density, temperature, moisture, and test direction on the thermal conductivity coefficient in pine wood. *Budownictwo i Architektura* 22(4):5-13. doi:10.35784/bud-arch.5452
- van Blokland J, Adamopoulos S (2022). Electrical resistance characteristics of thermally modified wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 80:749-752. doi:10.1007/s00107-022-01813-7.
- Zelinka SL, Stone DS, Rammer DR (2007). Equivalent circuit modeling of wood at 12% moisture content. *Wood and Fiber Science* 39(4):556-565. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1601>.
- Zelinka S, Gleber S, Vogt S, Rodríguez López G, Jakes J (2015). Threshold for ion movements in wood cell walls below fiber saturation observed by X-ray fluorescence microscopy (XFM). *Holzforschung* 69(4):441-448. doi:10.1515/hf-2014-0138.
- Žigon J, Petrič M, Dahle S (2021). Dielectric and surface properties of wood modified with NaCl aqueous solutions and treated with FE-DBD atmospheric plasma. *European Journal of Wood and Wood Products* 79:1117-1128. doi:10.1007/s00107-021-01708-z.

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

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/\(httpPages\)/555411BC0789755_6C1257C85004A5725?OpenDocument](http://www.unog.ch/80256EE60057D930/(httpPages)/555411BC0789755_6C1257C85004A5725?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. 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. 92 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: Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas.

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.