



Transformando el ciclo del agua El reúso es responsabilidad de todos

Lorena Margarita Limón González,
Nikte Norma Ocampo Guerrero y
Carmen Julia Navarro Gómez
(coordinadoras)



ASOCIACION MEXICANA DE HIDRAULICA

Transformando el ciclo del agua

El reúso es responsabilidad de todos

Lorena Margarita Limón González, Nikte Norma Ocampo Guerrero
y Carmen Julia Navarro Gómez
(coordinadoras)



ASOCIACIÓN MEXICANA DE HIDRÁULICA

Transformando el ciclo del agua. El reúso es responsabilidad de todos

Edición académica y coordinación editorial

Esther Pérez Guzmán

Cada capítulo de esta obra fue dictaminado por revisores externos y aprobados por el Comité Técnico-Científico.

Coordinadoras de obra

Lorena Margarita Limón González, Nikte Norma Ocampo Guerrero y Carmen Julia Navarro Gómez

Edición

Esther Pérez Guzmán

Diseño de interiores y de portada

Rafael Gómez Sánchez

Diagramación

Rafael Gómez Sánchez

Imagen de portada

Asociación Mexicana de Hidráulica

D.R. © 2025 de todos los autores: Ariosto Aguilar Chávez, Maritza Liliana Arganis Juárez, Felipe Ignacio Arreguín Cortés, Yoshiro Sususmo Azano Carrillo, Diana Vanesa Barajas Alvarado, Ulises Absalom Barajas Madrigal, José Antonio Bonilla Porras, Eliseo Carrizosa Elizondo, Jesús Eduardo Cecaña Osuna, Eduardo Chan Gaxiola, Christopher Contreras López, Juan Pablo del Conde Guadalajara, Faustino de Luna Cruz, Ramón Domínguez Mora, Claudia Annette Fernández Pérez, Juan Manuel Figueroa Mendiola, Luis Armando Gallegos de Lira, Saúl García Camacho, Liliana García Romero, María del Refugio González Sandoval, José Óscar Guerrero Angulo, Mauricio Guerrero Rodríguez, José Luis Herrera Alanis, Elizabeth Rosario Hernández Barrientos, Eduardo Herrera Peraza, Eduardo Hernández Samaniego, Sofía Limón Ochoa, Oscar Jesús Llaguno Guilberto, José Jaime Madrigal Barrera, Juan Francisco Humberto Marengo Mogollón, Raúl Medina Mendoza, Alejandro Mendoza Reséndiz, Saúl Andrés Minuche Cruz, Jomaelah Morales Rayo, Carmen Julia Navarro Gómez, Humberto Iván Navarro Gómez, Nikte Norma Ocampo Guerrero, Leonel Humberto Ochoa Alejo, Gil Humberto Ochoa González, Mario Alberto Olmos Márquez, Vanessa Ortiz Burciaga, Miguel Alberto Peña Balderas, Margarita Elizabeth Preciado Jiménez, José Manuel Ramírez León, Alma Itzel Rivera Flores, Omar Ulises Robles Pereyra, Sandra Elizabeth Rodríguez Heredia, José Manuel Rodríguez Varela, Sonia Tatiana Sánchez Quispe, David Humberto Sánchez Navarro, Jesús Rubén Sánchez Navarro, David Vargas del Río, Pablo Enrique Zamudio Zavala

Primera edición: abril 2025

ISBN: 978-607-97532-3-8

Hecho en México

Made in Mexico

El contenido de esta publicación es exclusivamente responsabilidad de sus autores. Las imágenes son propiedad de los autores. En algunas se emplearon herramientas de IA únicamente para mejorar la visualización.

Esta obra está bajo la licencia CC BY-NC-ND 4.0

Se permite citar, copiar y distribuir el contenido en cualquier medio y formato, sin adaptaciones, sin fines comerciales y otorgando siempre el crédito correspondiente a los autores.

XXXVI Consejo Directivo Nacional de la Asociación Mexicana de Hidráulica

Ing. Lorena Margarita Limón González
Presidenta sustituta

Ing. Víctor Manuel Buenosaires Esquivel
Primer Secretario

Mtro. Ernesto Marroquín Álvarez
Segundo Secretario

Mtra. Nikte Norma Ocampo Guerrero
Tesorera

Dra. Carmen Julia Navarro Gómez
Vocal

M. C. Lydia Meade Ocaranza
Vocal

Ing. Manuel Becerra Lizardi
Vocal

Ing. Humberto Blancarte Alvarado
Vocal

Comité técnico-científico

Adriana Amalia Cafaggi Félix

Universidad Nacional Autónoma de México

Roberto Carlos Díaz Paz

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Eloísa Domínguez Marani

Universidad Autónoma Metropolitana

Alfredo Granados Olivas

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Iliana López Mariano

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Karla Karina Romero Valdez

Universidad Autónoma de Sinaloa

Samantha Alejandra Sangabriel Alvarado

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Carlos Javier Villa Alvarado

Consultor privado

Índice

Presentación	7
1 Caracterización de zonas de riesgo por inundación asociadas a fenómenos hidrometeorológicos en el AMG Saúl García Camacho, Diana Vanesa Barajas Alvarado y Saúl Andrés Minuche Cruz	9
2 Metodología para el cálculo de la vulnerabilidad ante el cambio climático a escala municipal en México Sandra Lizeth Rodríguez Heredia, Liliana García Romero y Sonia Tatiana Sánchez Quispe	17
3 Estrategia didáctica lúdica para la enseñanza de la hidráulica Nikte Norma Ocampo Guerrero	26
4 Determinación de la incertidumbre de la velocidad y gasto instantáneo en un canal Ariosto Aguilar Chávez, Elizabeth Rosario Hernández Barrientos y Omar Ulises Robles Pereyra	34
5 Análisis del flujo en canales prismáticos utilizando IA y soluciones de código abierto Maritza Liliana Arganis Juárez, Faustino De Luna, Margarita Preciado, Eliseo Carrizosa, Ramón Domínguez y José Luis Herrera	41
6 ¿Debe México construir más presas de almacenamiento y derivación? ¿Debe destruir algunas existentes? José Francisco Humberto Marengo Mogollón y Felipe Ignacio Arreguín Cortés	50
7 Estudio de rotura de una presa de jales en la zona centro-norte de México Alma Itzel Rivera Flores y José Antonio Bonilla Porras	57
8 Evaluación Ambiental y de Estabilidad en el Entorno de la Presa de Jales Dos Carlos en Mineral de la Reforma, Hidalgo Humberto Iván Navarro Gómez, Christopher Contreras López, Carmen Julia Navarro Gómez y Mauricio Guerrero Rodríguez	66
9 Normatividad en materia de seguridad de presas Felipe Ignacio Arreguín Cortés y Juan Francisco Humberto Marengo Mogollón	73
10 Revisión sistemática de los datos de funcionamiento de vaso de grandes presas hidroeléctricas de México Maritza Liliana Arganis Juárez, Alejandro Mendoza Reséndiz y Ramón Domínguez Mora	79

11 Modelación unidimensional de un jardín de lluvia para analizar su comportamiento hidrológico hidráulico	
Oscar Jesús Llaguno Guilberto, Raúl Medina Mendoza, Juan Manuel Figueroa Mendiola, José Manuel Rodríguez Varela, Jomaelah Morales Rayo y Vanesa Ortiz Burciaga	88
12 Comparativo del rendimiento de los modelos lluvia-escurrimiento HBV y SAC-SMA en la cuenca del río Tepalcatepec	
Ulises Absalom Barajas Madrigal, José Jaime Madrigal Barrera y Sonia Tatiana Sánchez Quispe	95
13 Diseño de infraestructura de recarga de agua pluvial en el AMG: nomogramas para la gestión inteligente del agua	
Sofía Limón Ochoa, Yoshiro Susumo Azano Carrillo, David Vargas del Río, Gil Humberto Ochoa González, Pablo Enrique Zamudio Zavala y José Manuel Ramírez León	102
14 Hidrograma unitario adimensional para cuencas con o sin medición de escurrimientos	
José Óscar Guerrero Angulo, Jesús Eduardo Ceceña Osuna y Eduardo Chan Gaxiola	108
15 Propuesta para mejora del marco jurídico de manejo del agua restaurada	
Juan Pablo Del Conde Guadalajara	119
16 Evaluación de funcionamiento de redes de agua potable mediante modelación hidráulica e indicadores	
Luis Armando Gallegos de Lira y José Manuel Rodríguez Varela	125
17 Fiabilidad y exactitud del balance de agua potable	
Leonel Humberto Ochoa Alejo	133
18 Suministro intermitente de agua potable; un reto en Latinoamérica	
Eduardo Hernández Samaniego, Eduardo Herrera Peraza, David Humberto Sánchez, Carmen Julia Navarro Gómez, Humberto Iván Navarro y Jesús Rubén Sánchez Navarro	142
19 Agua regenerada: retos, oportunidades y viabilidad en el contexto de la potabilización	
Carmen Julia Navarro Gómez, Mario Alberto Olmos Márquez y Jesús Rubén Sánchez Navarro	151
20 Gestión del agua en México: desafíos y oportunidades	
David Humberto Sánchez Navarro y Claudia Annette Fernández Pérez	158
Directorio de autores	168

Presentación

La Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH) ha sido, a lo largo de seis décadas, un pilar fundamental en la creación y el intercambio de conocimiento sobre el agua en México. A través de sus congresos nacionales, seminarios, foros, cursos y publicaciones especializadas, la AMH se ha consolidado como un foro clave para la difusión de avances y soluciones innovadoras en el ámbito hidráulico. Su revista *Tláloc*, la de mayor circulación en el país especializada en agua, es solo un ejemplo de su destacada labor en la divulgación del conocimiento proporcionado por sus asociados, relacionado con la hidráulica y las ciencias del agua.

En el marco de la conmemoración de los 60 años de la AMH nos enorgullece presentar esta publicación titulada *Transformando el ciclo del agua. El reuso es responsabilidad de todos*. Los desafíos y oportunidades que enfrenta el mundo, y en particular México, en la gestión del agua, se dan en un contexto de reducción de su disponibilidad, principalmente derivada del cambio climático, el crecimiento poblacional y la contaminación. El propósito de este trabajo es proponer, desde distintas perspectivas y especialidades, una visión integral para la gestión sostenible del agua.

El impacto del cambio climático en el incremento de la vulnerabilidad hídrica ante fenómenos extremos obliga a las autoridades locales a contar con herramientas para identificar áreas vulnerables a inundaciones, que contribuyan a la planificación de infraestructuras resilientes. Estas infraestructuras deben ser diseñadas para mitigar el impacto hidrológico y el riesgo de desastres naturales. De este modo, se contarán con más elementos para evaluar los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos que promuevan políticas públicas preventivas y de adaptación.

Además, este volumen presenta un análisis comparativo de los modelos de lluvia-escurrimiento Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV) y Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA), herramientas clave para predecir y gestionar la escorrentía en cuencas hidrográficas. Complementariamente, se propone la conformación de un hidrograma unitario adimensional para cuencas con o sin medición de escurrimientos, herramienta útil para el diseño de infraestructuras hidráulicas.

Las herramientas presentadas en este compendio contribuyen a la determinación de la incertidumbre en la velocidad y el gasto instantáneo en un canal; un tema relacionado con la mejora en la precisión de las mediciones hidráulicas, que optimiza el diseño y la operación de sistemas de riego y drenaje. Asimismo, el uso de software libre y herramientas de inteligencia artificial (IA) para estimar el perfil del flujo en canales prismáticos representa una solución innovadora y accesible que mejora la eficiencia en el diseño y la gestión de sistemas hidráulicos.

A partir de la experiencia presentada durante la pandemia se aborda la relevancia de la enseñanza de la hidráulica, así como la necesidad de transformarla con la incorporación de métodos innovadores y lúdicos para facilitar la comprensión de conceptos complejos y fomentar la creatividad en los futuros profesionales del agua.

La discusión sobre la construcción de nuevas presas y el futuro de las existentes en México ocupa un lugar relevante en esta obra. Este tema merece ser revisado en un contexto de opiniones a menudo polarizadas, trayendo a la discusión las distintas aristas que estos proyectos presentan, sin perder de vista la necesidad de contar con reservas físicas de agua para satisfacer los distintos usos consuntivos y no consuntivos.

Para el último caso, se presenta una revisión de datos de funcionamiento de grandes presas hidroeléctricas en México y la normatividad en materia de seguridad de estas, aspectos esenciales para garantizar la estabilidad estructural y operativa de esta infraestructura y la protección de las poblaciones cercanas.

Este trabajo se complementa con dos investigaciones relacionadas con presas de jales: una enfocada en el análisis de la rotura de una presa de este tipo en el estado mexicano de Hidalgo. Tal estudio es crucial para comprender los riesgos ambientales asociados con las presas de jales y la importancia de un monitoreo constante para prevenir desastres.

Uno de los desafíos más urgentes, tema que da título a esta obra, es la gestión de agua regenerada, una solución que cobra cada vez más importancia debido a la escasez de recursos hídricos en muchas regiones del mundo, lo cual obliga a centrar la atención en esta alternativa en sus distintas modalidades y para diversos usos. La potabilización y el reúso del agua en México presentan una oportunidad para garantizar el abastecimiento en áreas con recursos limitados; sin embargo, su implementación enfrenta obstáculos normativos, tecnológicos, económicos y sociales que aún deben superarse.

El funcionamiento de redes de agua potable, la fiabilidad del balance de este tipo de agua y el análisis de su suministro intermitente en los sistemas de los países de América Latina también se exploran en esta publicación. Estos tópicos son fundamentales para mejorar la eficiencia en la distribución del agua y garantizar su acceso equitativo a todos los sectores de la población, especialmente en áreas rurales y marginadas.

El conocimiento y la innovación presentados en esta publicación tienen como objetivo ofrecer soluciones prácticas y basadas en evidencia para enfrentar los retos hídricos que encara nuestro país. A través de estos estudios se pretende fomentar un enfoque más consciente y responsable hacia el agua, al involucrar a todos los sectores de la sociedad en la tarea de conservarla y garantizar su disponibilidad para las futuras generaciones.

Con esta obra, la Asociación Mexicana de Hidráulica reafirma su compromiso con la educación, la investigación y la divulgación del conocimiento en temas hídricos. Al celebrar seis décadas de labor ininterrumpida, la AMH continúa su misión de generar un espacio de colaboración, innovación y reflexión en torno a uno de los recursos más valiosos de nuestro planeta: el agua.

El conocimiento fluye como el agua.

Ing. Reynaldo Díaz Hernández

1 Caracterización de zonas de riesgo por inundación asociadas a fenómenos hidrometeorológicos en el AMG

Saúl García Camacho
Diana Vanesa Barajas Alvarado
Saúl Andrés Minuche Cruz
Tecnológico de Monterrey

Resumen

En este trabajo se presenta una caracterización de zonas de riesgo por inundación asociadas a fenómenos hidrometeorológicos extremos en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). La metodología incluye identificar las zonas afectadas, analizar los eventos de lluvia y correlacionar con eventos hidrometeorológicos que permitan conocer las características hidrológicas e hidráulicas del sitio. Se sustenta en eventos históricos de lluvias que han

causado daños significativos en la infraestructura urbana del AMG; se evalúa también el riesgo hidrológico asociado.

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología muestra para los tres sitios evaluados, factores de riesgo asociados con las intensidades y periodo de retorno que nos permite entender la frecuencia futura y el impacto de estos fenómenos en el AMG.

Palabras clave: inundaciones urbanas, riesgo hidrometeorológico, fenómenos climatológicos extremos.

Antecedentes

Durante los últimos años, las inundaciones se han convertido en un problema cada vez más recurrente en las ciudades. Esto se debe principalmente a la rápida expansión de la población generado por un crecimiento urbano acelerado. Combinado con esto, las fuertes lluvias que provocan que el sistema de drenaje no sea capaz de manejar los volúmenes de agua que inundan las calles, hogares y espacios públicos puede, en muchas ocasiones, resultar en daños significativos, tanto a nivel material como humano.

Por otra parte, el aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos, como las tormentas severas, los ciclones, entre otros, también influye porque dichos eventos descargan una vasta cantidad de agua en cortos periodos, lo que supera la capacidad de los sistemas urbanos para evacuar el excedente, lo cual produce inundaciones rápidas y extremas, difíciles de contener. La falta de preparación ante eventos extremos demuestra que las ciudades necesitan reforzar sus capacidades para responder cuanto antes a ellos.

Metodología

La ciudad de Guadalajara en el estado mexicano de Jalisco enfrenta una problemática creciente relacionada con las inundaciones provocadas por fenómenos hidrometeorológicos extremos. Desde 2010, varios eventos históricos han dejado huella en esta urbe. Uno de los casos más notorios ocurrió en la colonia Las Pintas, donde lluvias torrenciales inundaron cientos de viviendas y afectaron la movilidad de la zona en ese año. En 2019, el cruce de Avenida Patria y Periférico Norte fue escenario de graves anegaciones, con vehículos atrapados y daños materiales importantes. Al año siguiente, en 2020, la zona de La Minerva y Chapalita vivió una fuerte inundación que causó estragos en comercios y viviendas, además de dificultar el tránsito por uno de los puntos más emblemáticos de la ciudad (*El Informador*, 2010, *El Occidental*, 2019, *El Informador*, 2020).

La ubicación del sitio en estudio se localiza en la avenida de la Patria en el AMG. Dentro de la cuenca de aportación se encuentra el observatorio meteorológico de Guadalajara en el Bosque de Colomos. El punto de interés se localiza a 550 metros de la entrada del bosque.

Este sitio se consideró para el análisis debido a que en este el 2 de septiembre de 2024 se presentó una inundación reportada por la Conagua. A partir de este punto hacia aguas arriba, la cuenca incluye áreas que contribuyen significativamente al escurrimiento en dirección hacia la zona de Atemajac siendo afluente del río Santiago. La cuenca delimitada nos permite entender el sistema de drenaje hidrológico de la cuenca, desde las áreas más elevadas hacia las zonas urbanas en la parte baja.

En la figura 1.1 se muestra la cuenca en el contexto del AMG (a) y el sitio de análisis en el contexto de la cuenca, así como la ubicación del Observatorio Meteorológico de Guadalajara (b).

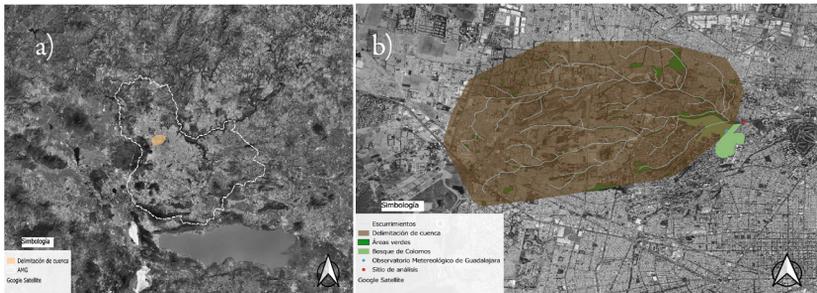


Fig. 1.1. a) Ubicación de la cuenca en el contexto del AMG. b) Sitio de análisis en el contexto de la cuenca. Fuente: Elaboración propia en QGIS.

Durante la temporada de lluvias en México, diversos sistemas meteorológicos interactúan para generar condiciones climáticas intensas en distintas regiones del país. De acuerdo con el boletín 494 del Sistema Meteorológico Nacional de Conagua y el análisis de los sistemas atmosféricos que están impactando al territorio, fenómenos como frentes fríos, zonas de baja presión y vaguadas monzónicas han provocado lluvias severas en el norte, centro y sur del país. Estos eventos climáticos pueden derivar en tormentas intensas, ráfagas de viento y la caída de granizo (Fig. 1.2).

Según los datos recopilados por la estación climatológica del Sistema Meteorológico Nacional de Conagua, en el parque Los Colomos, durante la temporada de lluvias entre los meses de junio y septiembre, la precipitación media diaria oscila entre 10 y 40 mm, dependiendo de las condiciones meteorológicas. En particular, el mes de septiembre destaca por sus

precipitaciones intensas, superando los 80 mm en días con tormentas fuertes (Conagua, 2024).

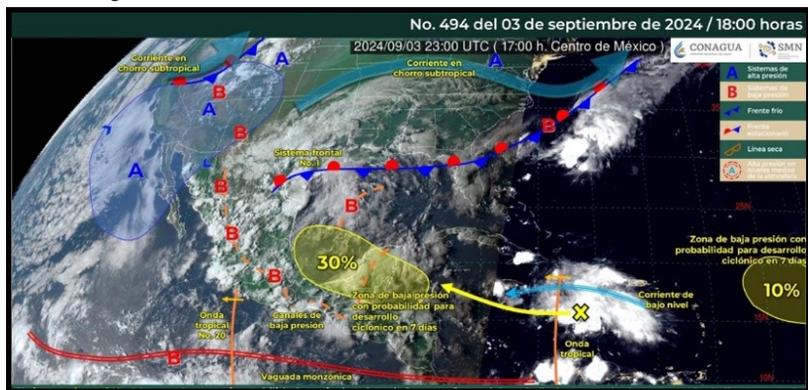


Fig. 1.2. Meteorología para el 3 de septiembre de 2024. Fuente: SMN, 2024.

Análisis hidrológico

El análisis hidrológico se realizó considerando el análisis de frecuencias, obtenido con el software AFA V1, posteriormente utilizando la metodología propuesta por Chen (2000):

$$F(x) = e^{-e^{-b}} \quad (1)$$

$$b = \frac{1}{0.77799s} (x - \bar{x} = x + 0.45s) \quad (2)$$

Donde:

x = magnitud del flujo (m^3/s)

\bar{x} = media del flujo (m^3/s)

s = desviación estándar de la magnitud del flujo (m^3/s)

En segunda instancia haciendo uso del método de Cheng-Lung Chen (Campos Aranda Daniel, Gómez de Luna Rubén, 1990) para el cálculo de las curvas intensidad-duración-periodo de retorno.

$$P_t^{tr} = \frac{a \cdot P1^{10} \log(10^{2-F} \cdot Tr \cdot f^1) d}{60(d + b)^c} \quad (3)$$

Donde:

D = duración de la tormenta en minutos

$P1^{10} = P60^{10}$ = lluvia de duración 1 hora y periodo de retorno 10 años

a, b y c = parámetro de la función del cociente R (cociente lluvia/duración)

$$R = \frac{P1^{Tr}}{P1_{24}^{Tr}} \quad (4)$$

El periodo de retorno se estableció en función de los resultados obtenidos en el cálculo de la intensidad.

Para el cálculo del coeficiente de escurrimiento se utilizó la NOM-011-CONAGUA-2015, debido a que se presentan diferentes usos del suelo en la cuenca de estudio. Se calculó un coeficiente de escurrimiento ponderado tomando en cuenta los diferentes coeficientes de escurrimiento (C) de acuerdo con el uso del suelo y la respectiva área que ocupaban cada uno.

Para calcular el gasto de escurrimiento de la cuenca se utilizó la fórmula de David R. Maidment:

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (5)$$

Donde:

Q = gasto de escurrimiento expresado en metros cúbicos por segundo

C = coeficiente de escurrimiento, valor adimensional

i = intensidad de la lluvia en milímetros por hora

A = área en kilómetros cuadrados

Resultados y discusión

Para el cálculo de intensidades se utilizó la función de Gumbel para calcular las precipitaciones para diferentes periodos de retorno (Tabla 1.1). Estas precipitaciones se compararon con la precipitación máxima del día 2 de septiembre, que fue de 21.4 mm (Fig.1.3).

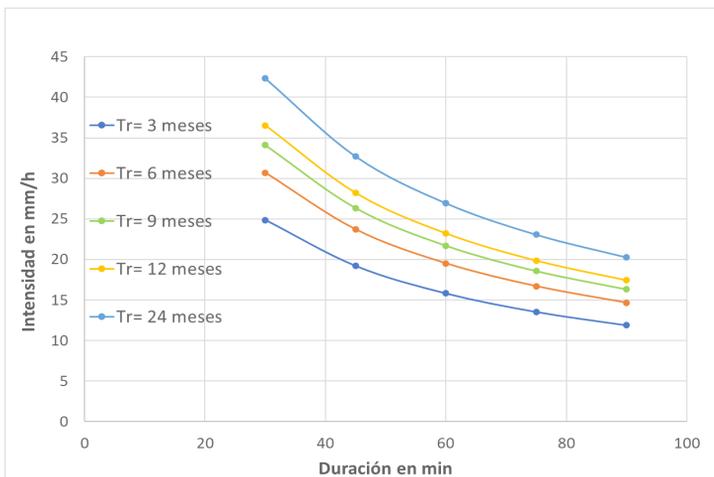


Fig. 1.3. Curvas I-D-T, estación Colomos. Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla 1.1. Precipitaciones máximas en mm a partir de los diferentes periodos de retorno y duraciones					
Periodo de retorno (meses)	Precipitaciones máximas (mm)				
	Duración (min)				
	30	45	60	75	90
3	12.43	14.41	15.82	16.92	17.83
6	15.35	17.78	19.52	20.88	22.00
9	17.05	19.76	21.69	23.20	24.45
12	18.26	21.16	23.23	24.85	26.18
24	21.17	24.53	26.93	28.81	30.36

Fuente: Elaboración propia, 2024.

De la metodología empleada se obtuvo un coeficiente de escurrimiento $C_e = 0.18$ (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Cálculo del coeficiente de escurrimiento

Cobertura	Cobertura %	Área de cobertura km ²	K	K _{parcial}
Bosque	5	1	0.24	0
Zona urbana	81	24	0.29	7
Asfalto	14	4	0.30	1

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla 1.3. Obtención del gasto para diferentes duraciones.

Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Intensidad (m/h)	Coefficiente de escurrimiento	Área (km ²)	Área (m ²)	Gasto (m ³ /s)
30	34.10	0.034	0.18	29.37	29368531.8	2.09
45	26.34	0.026	0.18	29.37	29368531.8	1.61
60	21.69	0.022	0.18	29.37	29368531.8	1.33
75	18.56	0.019	0.18	29.37	29368531.8	1.14
90	16.30	0.016	0.18	29.37	29368531.8	1.00

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las microcuencas dentro del AMG desempeñan un papel crítico en la gestión de los recursos hídricos. En el área que incluye el Bosque de Colomos, estas microcuencas actúan como amortiguadores naturales ayudando a reducir el flujo de agua y mitigar el impacto de las inundaciones. Durante el evento del 2 de septiembre, estas microcuencas se vieron superadas en su capacidad de absorción natural. La intensidad de la lluvia observada se estimó en una hora de duración, lo que apunta a que el máximo volumen de precipitación ocurrió en este periodo.

La interpretación que podemos darle a este parámetro hidrológico es que la mayor cantidad de volumen de agua se acumuló espacialmente en un corto tiempo. El análisis de frecuencias indica que este evento de lluvia intensa tiene un periodo de retorno de aproximadamente nueve meses. Esta periodicidad revela una vulnerabilidad en la región ante lluvias intensas frecuentes. Cabe destacar que, al obtener las áreas ponderadas, en el análisis del coeficiente de escurrimiento del AMG, se determinó que poco más del 80% de la cuenca es zona urbana, no obstante, su proximidad al bosque.

Los resultados obtenidos guardan similitud con los estudios reportados por el SIGmetro del Instituto Metropolitano de Planeación (Imeplan), lo que refuerza la metodología propuesta en nuestro análisis. Lo anterior añade un nivel de confiabilidad y respaldo a los hallazgos que indica que lo presentado en este trabajo se alinea con investigaciones similares. Este problema puede atribuirse directamente al riesgo hidrometeorológico, que implica que los fenómenos como lluvias intensas, tormentas o ciclones puedan causar daños severos en áreas urbanas. La vocación del suelo en zonas urbanas muestra una relación inversa entre la vulnerabilidad y el bajo potencial de infiltración.

Conclusiones

Para la zona de estudio y, de acuerdo con la información meteorológica disponible, indica que este evento de lluvia intensa se presenta aproximadamente cada nueve meses. A medida que las ciudades crecen en tamaño se vuelven vulnerables a fenómenos meteorológicos extremos subrayando la necesidad de medidas de mitigación y una planificación urbana adaptativa. Para hacer frente a la variación climática actual es necesario implementar medidas de mejora continua a la infraestructura de drenaje pluvial y adoptar otras de mitigación, no sólo en la zona de estudio sino en general en zonas urbanas que permitan enfrentar eventos extremos asociados a lluvia intensa.

Referencias

- Campos Aranda, D. F. y Gómez de Luna, R. (2015). Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 39-52.
- El Informador. (10 de julio 2010). Registran lluvias moderadas durante la madrugada de hoy. <https://www.informador.mx/Jalisco/Registran-lluvias-moderadas-durante-la-madrugada-de-hoy-20100710-0088.html>
- El Informador. (15 de julio 2019). Lluvia provoca desbordamiento de canal de Patria. <https://www.informador.mx/jalisco/Lluvia-provoca-desbordamiento-de-canal-de-Patria-20190715-0122.html>
- El Occidental. (6 de agosto 2020). Lluvias en Zapopan dejan inundaciones de hasta un metro de altura. <https://oem.com.mx/eloccidental/local/lluvias-en-zapopan-dejan-inundaciones-de-hasta-un-metro-de-altura-15874087>
- Servicio Meteorológico Nacional de la Conagua. (Septiembre 2024). Información hidrometeorológica recopilada en el Observatorio Meteorológico de Guadalajara.

2 Metodología para el cálculo de la vulnerabilidad ante el cambio climático a escala municipal en México

Sandra Lizeth Rodríguez-Heredia

Liliana García-Romero

Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Resumen

En las últimas décadas, los fenómenos climatológicos extremos han aumentado, considerablemente afectando a la sociedad, la economía y los ecosistemas. Aunque la sociedad ha intentado prepararse, los grupos con escasos recursos y sin apoyos gubernamentales enfrentan mayores dificultades de adaptación lo que evidencia la falta de respuesta eficaz ante fenómenos como inundaciones, huracanes, olas de calor y sequías.

En este capítulo se presentan los resultados de una investigación cuya metodología evalúa la vulnerabilidad social a nivel municipal para el estado de Michoacán, con el objetivo de mejorar la respuesta temprana ante el cambio climático.

El análisis se realizó a través de un índice de vulnerabilidad que considera factores como la exposición a eventos meteorológicos extremos, la sensibilidad de los grupos sociales, la medida de la calidad de vida y servicios de salud, así como la capacidad de adaptación en función de la disponibilidad de recursos y la respuesta ante estos eventos.

Finalmente, la metodología propone indicadores para analizar la vulnerabilidad desde las perspectivas económica, social y ambiental, con el fin de que las instituciones gubernamentales adopten medidas que preparen a la sociedad y así contribuir para reducir la vulnerabilidad ante fenómenos climatológicos extremos.

Palabras clave: cambio climático, vulnerabilidad, escala municipal, Michoacán.

Introducción

En las últimas décadas, los fenómenos meteorológicos extremos se han producido con mayor frecuencia y han aumentado considerablemente, lo cual afecta a las comunidades, su economía y ecosistemas. Aunque existen esfuerzos para mitigar el impacto de estos fenómenos, las comunidades con recursos limitados y sin apoyo gubernamental enfrentan mayores dificultades para adaptarse. Con el objetivo de mejorar la respuesta temprana ante el cambio climático, se requieren metodologías que permitan evaluar la vulnerabilidad social.

En este capítulo se explica cómo se diseñó una para aplicar a nivel municipal en el estado de Michoacán en México. El análisis se lleva a cabo mediante un índice de vulnerabilidad que considera factores como la exposición a eventos meteorológicos extremos, la sensibilidad de los grupos sociales y la capacidad de adaptación. Esta metodología busca proporcionar herramientas para reducir la vulnerabilidad a las instituciones gubernamentales y preparar a las comunidades con acciones ante eventos climáticos adversos.

Metodología para el cálculo de la vulnerabilidad

La metodología implementada para esta investigación semuestra en la figura 2.1.

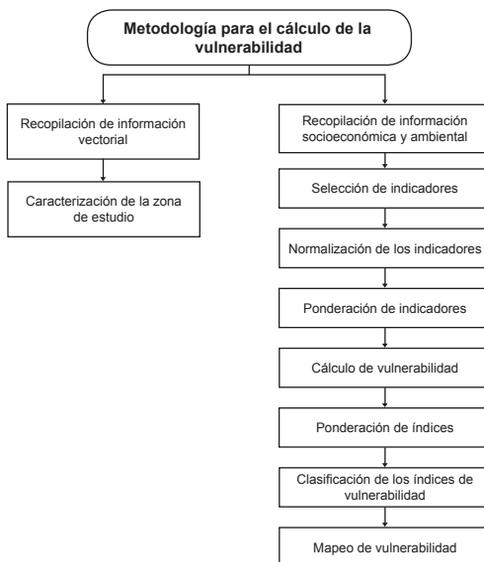


Fig. 2.1. Metodología para el cálculo de la vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia, 2024.

De acuerdo con la metodología propuesta se consideran dos aspectos clave: 1) la caracterización de la zona de estudio, mediante la recopilación de información vectorial que facilita su localización geográfica, y 2) la recopilación de datos socioeconómicos y climatológicos por medio de la plataforma del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020). En estos aspectos se incluyen procesos como la identificación de indicadores sociales, ambientales, económicos y climatológicos, los cuales se agrupan utilizando la ecuación 1.

$$V = f(GE, S, CA) \quad (1)$$

La vulnerabilidad (V) se puede definir con la expresión mostrada en la ecuación anterior (IPCC, 2023). La exposición (GE) está relacionada con desastres naturales, la sensibilidad (S) depende de factores sociales, la calidad de vida y el acceso a servicios, mientras que la capacidad de adaptación (CA) está basada en factores económicos, sociales e institucionales.

La selección de los indicadores dependerá de la información disponible en la zona de estudio. Una vez seleccionados los indicadores, se procede a normalizarlos. Debido a la naturaleza de cada indicador, estos suelen estar en diferentes unidades. La normalización ajusta los datos en un rango numérico que se encuentra entre 0 y 1. (Rodríguez y Ugalde, 2021).

Una vez que los indicadores han sido normalizados, se aplica el análisis de componentes principales (PCA) (Peres-Neto et al., 2005) para determinar la contribución o el peso de cada indicador en el cálculo de la vulnerabilidad, buscando una varianza de las variables del 85% entre los indicadores. Esta técnica multivariante busca establecer la correlación entre las variables independientes a través de una representación gráfica.

Al obtener los pesos de los indicadores se suma cada uno de ellos para calcular los pesos de los índices de los distintos factores que componen la vulnerabilidad, utilizando nuevamente PCA. Una vez obtenidos los resultados del grado de exposición, sensibilidad y la capacidad de adaptación, se asignan los mismos pesos o se asigna el mismo peso a cada factor para el cálculo del índice de vulnerabilidad. La caracterización de los datos se realizó mediante percentiles, como lo propone Ortega-Gaucin et al. (2018) en su trabajo en conjunto con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) tabla 2.1.

Finalmente, al obtener los resultados de la vulnerabilidad, numéricamente se procede a generar el mapeo de la zona de estudio, incluyendo el grado de exposición, sensibilidad y la capacidad de adaptación.

Tabla 2.1. Grado de vulnerabilidad.		
	Grado de vulnerabilidad	Valor de percentil
	Muy baja	$0 < V < 20$
	Baja	$20 < V < 40$
	Media	$40 < V < 60$
	Alta	$60 < V < 80$
	Muy alta	$80 < V < 100$

Fuente: Adaptado de Ortega-Gaucin et al., 2018.

Resultados

Michoacán se distingue por su amplia extensión geográfica y como una entidad que ocupa los primeros lugares en producción agrícola a nivel nacional, destacando en la exportación de aguacate, limón, fresa, zarzamora, entre otros productos. El estado está compuesto por 113 municipios, que representan el 3% del territorio nacional. Su capital es Morelia. Michoacán se caracteriza por su diversidad de regiones, climas, tradiciones y topografía.

Siguiendo la metodología propuesta, los indicadores sociales, ambientales y económicos seleccionados, junto con sus respectivas ponderaciones obtenidas mediante PCA. Los indicadores seleccionados para cada componente se muestran en la tabla 2.2 para el grado de exposición, para la sensibilidad en la tabla 2.3 y para la capacidad de adaptación en la tabla 2.4.

Tabla 2.2. Ponderación de grado de exposición			
Índice	Ponderación	Indicadores	Ponderación
Actividades antropogénicas	51%	Superficie deforestada	50%
		Superficie con incendios	50%
Temperaturas	7%	Rango de temperaturas	40%
		Temperaturas máximas	27%
		Temperaturas mínimas	33%
Susceptibilidad a las sequías	42%	Índice de aridez	46%
		Evapotranspiración anual	34%
		Precipitación anual	20%

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla 2.3. Ponderación de sensibilidad			
Índice	Ponderación	Indicadores	Ponderación
Economía	21%	Población en condiciones de pobreza	34%
		Población carencia por acceso a la alimentación	33%
		Población con ingresos inferior a la línea de bienestar	33%
Educación	19%	Población de 6 a 14 años que no asisten a la escuela	24%
		Población analfabeta mayor de 15 años	26%
		Población con educación básica mayor a 15 años	25%
Salud	20%	Población sin derecho a servicios de salud	34%
		Población con discapacidad	33%
		Población ocupada no dependiente de la razón social	33%
Población	20%	Población menor a 5 años	33%
		Población mayor a 65 años	34%
		Población migrante	33%
Social	20%	Viviendas que no disponen de agua entubada de la red pública	20%
		Viviendas que no disponen de lavadora	21%
		Viviendas que no disponen de tinaco	19%
		Vivienda que no dispone de cisterna	20%
		Viviendas que no disponen de refrigerador	20%

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla 2.4. Ponderación de capacidad de adaptación			
Índice	Ponderación	Indicadores	Ponderación
Ambiental	2%	Superficie rehabilitada al riego	48%
		Superficie reforestada	48%
		Superficie cosechada temporal	4%
Economía	25%	Producto ingreso bruto	48%
		Población económicamente activa	48%
		Producción agrícola (miles de pesos)	4%
Salud	25%	Población afiliada a servicios de IMSS	23%
		Población afiliada a servicios de INSABI	20%
		Población afiliada a servicios de ISSSTE o ISSSTE Estatal	23%
		Población afiliada a servicios de IMSS Bienestar	11%
		Población afiliada a servicios de salud privada	23%
Educación	24%	Años promedio de escolaridad	26%
		Población con educación básica	37%
		Población con alfabetización mayor de 25 años	37%
Social	24%	Viviendas particulares habitadas, que disponen de computadoras	33%
		Viviendas particulares habitadas, que disponen de teléfonos	34%
		Viviendas particulares habitadas, que disponen de internet	33%

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para el cálculo del índice de vulnerabilidad, se asignó el mismo peso a cada uno de los índices, lo que permitió clasificar el nivel de vulnerabilidad de cada municipio. Esta información se representó de manera geoespacial a través de la interpolación de información en mapas. En la figura 2.2 se muestra el mapeo del cálculo del índice de vulnerabilidad, mientras que en la figura 2.3 se presenta el grado de vulnerabilidad de los 113 municipios que conforman el estado.

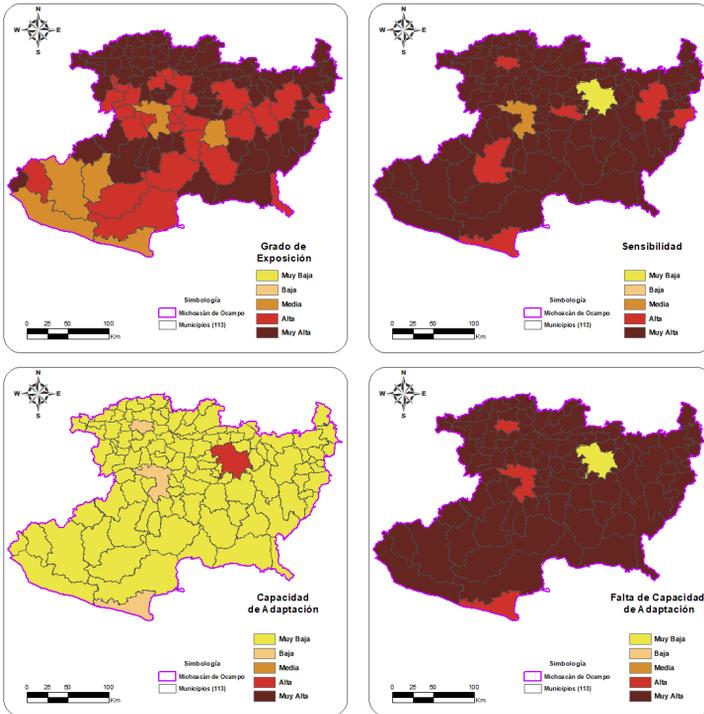


Fig.2 2. Mapa del índice de vulnerabilidad a escala municipal para el estado de Michoacán. Fuente: Elaboración propia, 2024.

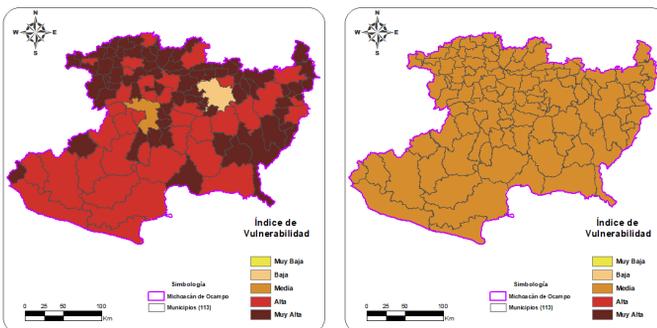


Fig.2.3. Grado de vulnerabilidad a escala municipal para el estado de Michoacán. Fuente: Elaboración propia, 2024.

Conclusiones

A partir del análisis geoespacial se puede afirmar la estimación de la vulnerabilidad ante el cambio climático a escala municipal mediante un enfoque basado en el análisis de componentes principales y la integración de factores como el grado de exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación. Esta metodología permite identificar con mayor precisión las áreas más vulnerables y los factores que contribuyen a su susceptibilidad, lo que proporciona información clave para la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo.

Para Michoacán, el mapa generado con la variable de capacidad de adaptación muestra una distribución homogénea de la vulnerabilidad en los 113 municipios analizados, lo que sugiere que esta variable por sí sola no es suficiente para diferenciar las condiciones de riesgo entre las distintas regiones. Sin embargo, al incorporar la falta de capacidad de adaptación en el cálculo del índice de vulnerabilidad, se obtiene una representación más precisa, lo que evidencia con mayor claridad las deficiencias sociales, económicas y ambientales que enfrenta cada comunidad.

En este sentido es fundamental reconocer que un alto nivel de exposición implica una mayor frecuencia de impactos por el cambio climático, mientras que una elevada sensibilidad está asociada con limitaciones en el acceso a servicios esenciales como salud, educación y seguridad. A su vez, una mayor falta de capacidad de adaptación refleja la incapacidad del sistema para responder de manera eficiente ante los cambios o perturbaciones climáticas, lo que incrementa significativamente la vulnerabilidad de la población afectada.

La metodología aplicada no solo proporciona una alternativa para la estimación de la vulnerabilidad a nivel municipal, sino que también resulta particularmente valiosa en contextos donde no existe un enfoque metodológico estándar a nivel global. El uso del análisis de componentes principales facilita la selección de los indicadores más relevantes, optimiza la construcción del índice de vulnerabilidad y permite su adaptación a las características específicas de cada región.

Referencias

- INEGI. (2020). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Subsistema de Información y Demografía y Social. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Resultados_generales.
- IPCC. (2023). IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Rodríguez, J., y Ugalde, E. (2021). Impacto de la estandarización y escalado: factor para predicción de costos en proyectos a través de una red neuronal artificial. *Revista Chilena de Ingeniería*, 20(2), 265–275.
- Peres-Neto, P. R., Jackson, D. A., y Somers, K. M. (2005). How many principal components? stopping rules for determining the number of non-trivial axes revisited. *Computational Statistics y Data Analysis*, 49(4), 974–997. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.06.015>.
- Ortega-Gaucin, D., De la Cruz, J., y Castellano, H. V. (2018). Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/2192>.

3 Estrategia didáctica lúdica para la enseñanza de la hidráulica

Nikte Norma Ocampo Guerrero

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Resumen

La enseñanza de conceptos complejos en hidráulica requiere de métodos pedagógicos que faciliten la comprensión y aplicación de principios.

La estrategia didáctica lúdica se fundamenta en principios sólidos de aprendizaje experiencial, activo, y colaborativo, así como en la gamificación y el uso de herramientas didácticas efectivas. La combinación de actividades prácticas y juegos permite a los estudiantes experimentar, explorar y aplicar conceptos de hidráulica de manera interactiva, promoviendo una comprensión más profunda y duradera.

La estrategia propuesta, que incluye el uso de las gráficas adimensionales, para fomentar el aprendizaje activo en la resolución de problemas aplica conceptos de la didáctica en un juego que se elabora con materiales asequibles (sin necesidad de conocimientos de programación pues no es un videojuego) y puede desarrollarse en espacios reducidos como las aulas.

El juego de mesa propuesto incorpora elementos de gamificación, como tableros, dados, gráficas, desafíos y puntuaciones, que hacen que el aprendizaje sea más atractivo y motivador.

Palabras clave: gamificación en el aula, didáctica lúdica, enseñanza de la hidráulica, aprendizaje activo en la hidráulica.

Introducción

En este trabajo se asume como objeto de análisis las actividades de enseñanza y aprendizaje en la educación superior basadas en juegos educativos y metodologías de diseño que guían el proceso de pensamiento creativo y ayudan a garantizar un trabajo de calidad.

El diseño de juegos se desarrolla en múltiples niveles e involucra a profesionales de diversas disciplinas creativas y académicas en el ámbito de la investigación y de la práctica del juego (Hunicke, 2004), mediante mecanismos fundamentales de los sistemas de juego, los objetivos generales del diseño y el impacto deseado de la experiencia lúdica.

El uso de juegos en el aula universitaria se justifica por su capacidad para promover un aprendizaje significativo, que se traduce en una comprensión profunda y duradera de los contenidos. El aprendizaje ocurre de manera más efectiva cuando los estudiantes pueden construir activamente su conocimiento mediante experiencias. En este sentido, los juegos ofrecen un entorno interactivo que fomenta la participación activa y la colaboración, elementos clave para el aprendizaje significativo.

El marco teórico de la gamificación sugiere que la incorporación de elementos lúdicos puede aumentar la motivación intrínseca de los estudiantes, lo que, según Deci y Ryan (1985), es fundamental para el aprendizaje autónomo y la autodeterminación. La posibilidad de experimentar y practicar en un contexto de juego permite a los estudiantes aplicar teorías en situaciones prácticas, facilitando una mejor asimilación de los conceptos (Gee, 2003).

Deterding et al. (2011) aseguran que la gamificación se basa en la aplicación de elementos de juego en contextos no lúdicos para aumentar la motivación y el compromiso. Según esta teoría, la inclusión de mecánicas de juego, como desafíos y recompensas, puede mejorar la participación y el aprendizaje. Por su parte, Kolb (1984) sugiere que el aprendizaje es un proceso continuo de adaptación a través de la experiencia. Según su modelo, el aprendizaje efectivo se produce cuando los estudiantes participan activamente en actividades prácticas, reflexionan sobre sus experiencias y aplican lo aprendido en nuevas situaciones. El aprendizaje activo implica que los estudiantes participen en actividades que requieren de su compromiso y reflexión activa, (Bonwell y Eison, 1991).

La enseñanza de conceptos complejos en hidráulica requiere de métodos pedagógicos que faciliten la comprensión y aplicación de estos principios. La estrategia didáctica lúdica se fundamenta en principios sólidos de aprendizaje experiencial, activo, y colaborativo, así como en la gamificación y el uso de herramientas didácticas efectivas. La combinación de actividades prácticas y juegos permite a los estudiantes experimentar, explorar y aplicar conceptos de hidráulica de manera interactiva, promoviendo una comprensión más profunda y duradera.

La estrategia propuesta en este capítulo se centra en el tema del cálculo de tirantes conjugados en canales de diferentes geometrías (concepto complejo), a través de un juego de mesa en el aula que permite la experiencia tangible y aplicada. Se toma en cuenta la problemática evidenciada en las aulas al retorno del confinamiento por el COVID19, pues se detectaron deficiencias en el uso y manejo de herramientas electrónicas de cálculo, a pesar de que los estudiantes tienen hoy un mejor acceso a las tecnologías, lo cual no asegura la mejora en su rendimiento.

Así, el objetivo de esta estrategia es implementar un prototipo de juego funcional con instrucciones para fomentar el aprendizaje activo en la resolución de problemas al que se incorporan elementos para la gamificación, como tableros, dados, gráficas, desafíos y puntuaciones, que hacen el aprendizaje más atractivo y motivador.

Materiales y métodos

El material central de esta estrategia es un juego de mesa diseñado específicamente para abordar el cálculo de tirantes conjugados. La idea de partida es que el juego debe permitir el cálculo sencillo y gráfico de los tirantes conjugados del salto hidráulico. Los jugadores podrán experimentar con diferentes valores de parámetros hidráulicos y observar cómo estos afectan los tirantes conjugados del salto. Para ello, se utilizaron las herramientas gráficas disponibles en la literatura.

Debido a que es un juego para el aula, el profesor se apoya en el modelo explicativo para introducir el tema del salto hidráulico a los jugadores. El tablero está representado por los diagramas adimensionales para el cálculo de tirantes conjugados en diferentes tipos de canales con geometrías diversas (rectangulares, trapezoidales y triangulares). Para simular datos aleatorios

sobre combinaciones de caudal, geometría y conjugado, se utilizan dados. Las cartas de desafío son la combinación específica de los datos relacionados con el salto hidráulico para determinar el tirante conjugado para cada tirada de dados (Fig. 3.1).

Se emplean la calculadora científica y el cronómetro como herramientas auxiliares para la solución de la carta de desafío y para cronometrar el tiempo de resolución. El sistema de puntuación está basado en la rapidez y precisión con que los estudiantes resuelven los desafíos.



Fig. 3.1. Materiales sobre la mesa de juego.

El diseño e implementación del juego se llevó a cabo con un enfoque de didáctica lúdica, mediante juegos para el aprendizaje significativo. El desarrollo del juego se hizo en un taller del programa de actualización académica de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM. Los participantes fueron docentes de otras áreas.

Se hizo una primera versión del juego que resultó poco atractiva y hasta aburrida debido a su enfoque centrado en cálculos repetitivos con una combinación cerrada de variables (un dado) y respuestas (urnas con fichas de respuestas), parecido a un ejercicio de relacionar columnas, lo que resultó limitante para fomentar la interacción y carácter lúdico del juego. Una vez agotadas las combinaciones del dado, el juego perdía interés. Los compañeros profesores proporcionaron retroalimentación sobre el diseño de los componentes entre la que destacó la necesidad de evitar cerrar el juego. Se incluyó un modelo explicativo en acrílico y tiras de papel para moverlo con

aire, que auxilia al profesor en la introducción del tema y también sirve como estuche para guardar los elementos del juego, ofreciendo una experiencia más completa. El modelo en acrílico puede ser sustituido por videos explicativos.

Considerando la retroalimentación recibida, se buscó enfoque más flexible y sencillo. Se optó por usar los diagramas de solución presentes en la bibliografía, adecuados para una comprensión inicial del tema en clase y se reformularon las variables de los dados para que fueran números obtenidos mediante operaciones simples. En este trabajo se presenta la versión final que puede aplicarse en el aula.

Si bien este trabajo se hizo para el tema de salto hidráulico, el lector puede seguir la estrategia para cualquier tema complejo con las herramientas de cálculo disponibles y materiales.

La validación del juego se hizo con la siguiente metodología. **Introducción al concepto.** Los participantes del taller recibieron una breve explicación sobre el tema con el modelo explicativo en acrílico y papel. De esta experiencia, el juego se denominó “Saltos con-juga2” (Fig. 3.2).

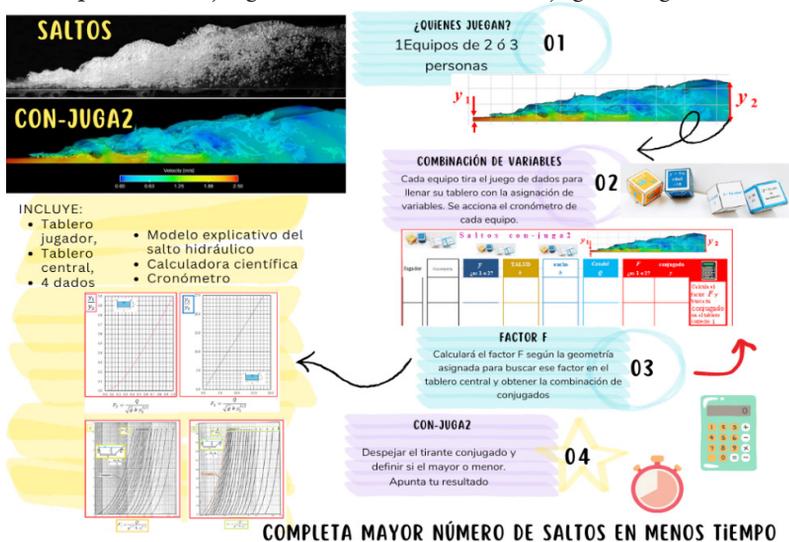


Fig. 3.2. Postal del juego "Saltos con-juga-2".

Determinación de la reglas con base en el objetivo de aprendizaje, que es calcular tirantes conjugados del salto hidráulico. Las reglas del juego son las siguientes:

- Los equipos están compuestos por dos o tres jugadores.
- Cada equipo lanza los dados para completar su tablero con la asignación de variables, activando su cronómetro, calcula el factor F según la geometría asignada para buscarlo en el tablero y obtiene la combinación de tirantes conjugados; resuelve el tirante incógnito y determina si es mayor o menor en su carta de desafío.
- El equipo que complete su carta de desafío con más tiradas en menos tiempo será el ganador.

Desarrollo de la actividad. Los participantes, organizados en equipos, jugaron en sesiones de 10 minutos. Cada equipo debía resolver los problemas presentados en las cartas de desafío utilizando las herramientas proporcionadas.

Evaluación formativa. Durante el juego se debe observar el desempeño de los participantes y proporcionar retroalimentación inmediata.

Análisis posactividad. Se discutieron las soluciones, se aclararon dudas y se evaluaron las estrategias utilizadas por los participantes.

Resultados y discusión

La experiencia en la implementación del juego generó resultados en términos de aprendizaje, motivación y participación activa de los participantes quienes lograron identificar y aplicar correctamente los conceptos relacionados con el salto hidráulico. Esto se reflejó en su capacidad para resolver problemas presentados en las cartas de desafío, usando el tablero central (gráficas adimensionales) y herramientas auxiliares como calculadora y cronómetros.

La actividad favorece el aprendizaje activo, corroborando los principios de Kolb (1984) y Bonwell y Eison (1991), quienes subrayan que la participación práctica mejora la retención y aplicación de conocimientos.

Mediante los elementos como desafíos, puntuaciones y un sistema competitivo, se elevó la motivación intrínseca de los participantes. Según la retroalimentación obtenida, los participantes percibieron la actividad como entretenida y desafiante, mejorando su involucramiento en el aprendizaje. Esto valida las afirmaciones de Deterding et al. (2011) y Deci y Ryan (1985), que vinculan la gamificación con un aumento de la motivación y el compromiso en contextos no lúdicos.

A partir de una primera versión poco interactiva, el juego evolucionó hacia un diseño más flexible e inclusivo, con mayor variabilidad en las combinaciones de datos y retos. El uso del modelo explicativo en acrílico como complemento visual y tangible también contribuyó a clarificar conceptos. Esto resalta la importancia de un diseño activo basado en retroalimentación, como lo señala Hunicke et al. (2004).

Conclusiones

La estrategia didáctica lúdica basada en un juego de mesa ha demostrado ser una herramienta efectiva para la enseñanza de conceptos complejos en hidráulica, específicamente en el cálculo de tirantes conjugados. Esta metodología no solo facilita la comprensión de los conceptos, sino que también motiva a los estudiantes, fomenta el aprendizaje activo y mejora su capacidad para resolver problemas en equipo. Se recomienda la implementación de esta estrategia en otros temas de hidráulica y su adaptación a diferentes áreas de la ingeniería, dado su potencial para transformar el proceso de enseñanza-aprendizaje en estas disciplinas.

Esta experiencia refuerza la necesidad de seguir investigando y desarrollando herramientas educativas innovadoras que combinen principios pedagógicos sólidos con elementos de gamificación.

Este enfoque no solo refuerza el conocimiento técnico, sino que también fomenta habilidades interpersonales y cognitivas críticas para los futuros ingenieros. La experiencia lúdica conecta teoría y práctica, preparando a los estudiantes para desafíos reales en su campo profesional.

La metodología es adaptable a otros temas complejos en ingeniería y áreas relacionadas. Con modificaciones adecuadas, el enfoque puede implementarse en diferentes contextos educativos para promover un aprendizaje dinámico y colaborativo.

Referencias

- Bonwell, C. C., y Eison, J. A. (1991). *Active Learning: Creating excitement in the classroom*. ASHE-ERIC Higher Education Reports. The George Washington University, School of Education and Human Development, 121 p.

- Deci, E. L., y Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. New York, Plenum.
- Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., y Nacke, L. (septiembre 2011). From game design elements to gamefulness: defining "gamification". *Proceedings of the 15th international academic MindTrek Conference: Envisioning future media environments*, pp. 9-15.
- Gee, J. P. (2003). What video games have to teach us about learning and literacy. *Computers in entertainment (CIE)*, 1(1), 20-20.
- Hunicke, R., LeBlanc, M., y Zubek, R. (julio 2004). MDA: A formal approach to game design and game research. *Proceedings of the AAAI Workshop on Challenges in Game AI 4(1)*, p. 1722.
- Kolb, D. A. (1984). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Prentice Hall.
- Prince, M. (2004). Does active learning work? A review of the research. *Journal of Engineering Education*, 93(3), pp. 223-231.

4 Determinación de la incertidumbre de la velocidad y gasto instantáneo en un canal

Ariosto Aguilar Chávez

Elizabeth Rosario Hernández Barrientos

Omar Ulises Robles Pereyra

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

En el flujo de un canal, el valor del gasto instantáneo es un dato muy importante en la transferencia de volumen o para revisar su funcionamiento hidráulico. El método de área-velocidad se considera un proceso primario y trazable para determinar el gasto instantáneo. El estándar de referencia es la ISO 748, en la que se recomienda determinar la velocidad puntual con un equipo que tenga como referencia una calibración previa, con incertidumbre tipo B.

En este capítulo se presentan los resultados de un trabajo en el que se realizó un análisis de incertidumbre tipo A para el equipo de referencia con un tubo Pitot, considerado primario ya que la velocidad puntual se determina por el principio de transformación de energía cinética en potencial.

Al aplicar el método área-velocidad, las áreas se ajustaron de acuerdo

con el cambio en la forma del perfil de velocidad, considerando la condición de no deslizamiento en las paredes del canal y que la velocidad media se ubica en un 40% fuera de esta zona. Sobre la sección transversal se aplicó un seccionamiento de 10 dovelas en la horizontal y vertical y para calcular el caudal instantáneo se sumó el caudal volumétrico de cada área. El valor de la incertidumbre global se determinó considerando la varianza expandida al 95% de intervalo de confianza. Además, se determinó la variación de la vortici- dad en los componentes vertical y transversal en cada dovela.

Los resultados obtenidos se mues- tran en una carta de incerti- dumbre, conforme con lo indicado en la *Guide of Uncertainty Measu- rement*, y se obtuvieron valores del orden menor al 0.5% sobre el gasto instantáneo.

Palabras clave: metrología, canal, flujo de un canal, gasto, valor del gasto instantáneo, método de área-velocidad.

Introducción

En el manejo de los canales con flujo a superficie libre la transferencia de volumen o también denominado gasto instantáneo conforme al estándar NMX-AA-179-SCFI-2018 (2018), es un parámetro con alcance legal en la medición de los volúmenes de aguas nacionales usados, aprovechados o explotados. En el Anexo J del estándar NMX-AA-179-SCFI-2018 se indica el procedimiento para calibrar un sistema de medición y se debe aplicar un método trazable en la medición del gasto instantáneo.

A continuación se presenta el proceso para determinar la incertidumbre en la medición del gasto instantáneo al aplicar el método de área-velocidad conforme con el estándar ISO-178 (2007). En este caso se utiliza un equipo de medición de velocidad puntual de presión diferencial, también denominado tipo Pitot (IAHR Monograph, 2017).

El proceso para estimar la incertidumbre se realizó en dos etapas: la primera es una incertidumbre combinada estándar tipo A (BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML, 1995) para la medición de la velocidad en un segmento de área transversal, posteriormente una incertidumbre tipo B en la estimación del gasto instantáneo.

Materiales y métodos

El valor del gasto instantáneo que pasa en una sección transversal se puede determinar con la relación siguiente:

$$q_n = \int_S u_i n_i dA \approx \sum_{i=1}^J q_i \quad (1)$$

Donde:

q_n = gasto instantáneo circulante en una sección transversal

$u_i(x_i)$ = vector velocidad, que corresponde a las componentes

$u_i(u_1, u_2, u_3)$, para las coordenadas x_i , para $i = 1, 2, 3$

n_i = vector normal a la sección transversal

$A = \int_S dA$, superficie de la sección transversal

q_i = gasto instantáneo en un segmento o área parcial de la sección transversal

El segmento de la superficie se estableció al dividir n anchos y m , alturas. Entonces el área transversal del canal es $A = \sum_{i=1}^l b_i h_i$, donde $I = \{1, \dots, m \times n\}$, es la secuencia del conjunto de las dovelas.

El gasto instantáneo en una dovela q_i , se determinó con un medidor de presión diferencial o Pitot, que tiene el principio de transformar la energía cinética en presión hidrodinámica, con la relación siguiente:

$$q_i = b_i h_i \sqrt{2g\Delta b_i} \quad (2)$$

Donde:

Δb_i = presión hidrodinámica medida con el equipo Pitot

g = aceleración de la gravedad.

En el proceso experimental el valor del gasto q_i se determinó la incertidumbre con un método estadístico, por tanto, se consideró la incertidumbre tipo A. La función de estado para gasto en una celda es:

$$f(b_i, h_i, \Delta b_i) = f(X_j) = 0 \quad (3)$$

En la relación anterior, X_j es el conjunto de variables de un muestro experimental, a estas se puede aplicar un proceso estadístico de forma que $X_j = \bar{X}_j + \sigma_{X_j}$, en donde \bar{X}_j es la media y σ_{X_j} , la dispersión de los valores estimado con la desviación estándar.

Al sustituir la estimación estadística de los datos experimentales, en la ecuación 3, se tiene que $f(\bar{X}_j + \sigma_{X_j}) = 0$. Para estimar la variación de los parámetros de muestreo se aplica una expansión en serie de Taylor, tal que:

$$f(\bar{X}_j + \sigma_{X_j}) = f(\bar{X}_j) + \sigma_{X_j} \left. \frac{\partial f}{\partial X_j} \right|_{\bar{x}_j} + \sigma_{X_j} \sigma_{X_k} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial X_j \partial X_k} \right|_{\bar{x}_j} + \dots$$

Por el tipo de problema indicado en la función de estado (ecuación 3), las variables son ortogonales, entonces los términos de la serie de Taylor, después del término lineal son nulos, por la anterior la estimación de la incertidumbre en forma adimensional se puede calcular, como:

$$E_f^2 \leq \sum_{j=1}^3 E_j^2 \quad (4)$$

Donde:

E_f = incertidumbre combinada estándar tipo A para el gasto q_i .

En la ecuación 4 se considera la desigualdad del triángulo en la suma de las incertidumbres por cada parámetro X , tal que:

$$E_1 = u_c \sigma_{Xb} \left| \frac{\partial f}{\partial b_i} \right| f^{-1} = u_c \sigma_{Xb} \frac{1}{b_i} \quad (5)$$

$$E_2 = u_c \sigma_{Xb} \left| \frac{\partial f}{\partial h_i} \right| f^{-1} = u_c \sigma_{Xb} \frac{1}{h_i} \quad (6)$$

$$E_3 = u_c \sigma_{\Delta b} \left| \frac{\partial f}{\partial \Delta b_i} \right| f^{-1} = u_c \frac{1}{2} \sigma_{X\Delta b} \frac{1}{\sqrt{\Delta b_i}} \quad (7)$$

En las expresiones 5, 6 y 7 para evaluar una incertidumbre expandida al 95% se afecta por el factor de cobertura u_c , que depende del número de grados de libertad en función del número de muestras experimentales, conforme al apéndice B del GUM (BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML, 1995).

Finalmente, para determinar la incertidumbre del gasto instantáneo, (ecuación 1), se considera una incertidumbre tipo B, por tanto, se establece con la suma cuadrática de las incertidumbres expandidas tipo A de las velocidades en cada celda.

Resultados y discusión

El proceso experimental se realizó en un canal de pendiente fija en el laboratorio de hidráulica del posgrado del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, con dimensiones de 0.6 m de ancho, 0.6 m de alto y 8 m de longitud. La sección transversal de medición se ubicó a una distancia 4.0 m y se hizo circular un gasto instantáneo en una condición uniforme y permanente, con un tirante de $h = 0.32m$. La configuración de la malla de medición tiene una distribución no regular, considerando una celda de medición que permita alojar el tubo Pitot lo más cercano a la pared y las celdas subsecuentes tiene una progresión logarítmica, para asimilar una distribución del perfil de velocidad del mismo tipo.

Los conjuntos de ubicaciones verticales y transversales son

$$Y_i = \{0.0075, 0.014, 0.02, 0.026, 0.0375, 0.055, 0.0775, 0.1075, 0.1525, 0.22, 0.2675, 0.305\}$$

$$Z_i = \{0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.23, 0.38, 0.50, 0.55, 0.58, 0.59\}$$

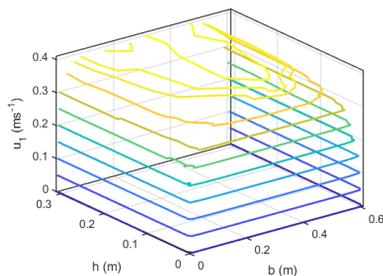
por lo anterior $m = 12$ y $n = 11$ y se tienen $I = 132$ puntos de muestreo.

En cada punto de muestreo se realizaron al menos 20 registros de datos, con lo cual se tiene 19 grados de libertad y un factor de cobertura $u_c \approx 2.09$.

Finalmente, se realizaron $I = 132$ recetas de incertidumbre expandida, en la tabla 4.1, se muestra el ejemplo para celda $i = 32$.

Tabla 4.1. Receta de incertidumbre tipo A para la sección						
X_j	Unidad	$f(\bar{X}_j)$	$u_c \sigma_{\bar{X}_j}$	$\left. \frac{\partial f}{\partial X_j} \right _{\bar{X}_j}$	E_i	Contribución al error%
b_i	m	0.0300	2.887E-04	1.100E-02	3.175E-06	30.84%
h_i	m	0.0300	2.887E-04	1.100E-02	3.175E-06	30.84%
Δh	m	0.0069	1.638E-04	2.408E-02	3.946E-06	38.32%
q_i	$m^3 \cdot s^{-1}$	0.00033				
q_i	$l \cdot s^{-1}$	0.3299		$E_f(m^3 \cdot s^{-1})$	1.030E-05	100%

Con los gastos determinados en cada celda se determinó el gasto instantáneo con un valor $q_n = 0.06854 \pm 2.151 \times 10^{-4} m^3 \cdot s^{-1}$ ($68.53 \pm 0.215 l \cdot s^{-1}$), con un intervalo de confianza al 95%.



En la figura 4.1 se muestra una superficie de extrusión de las isotacas en la sección transversal y en las figuras 4.2 y 4.3 se muestran la variación de los perfiles de velocidad en la vertical y en forma transversal.

Fig. 4.1. Superficie de extrusión de las isotacas en la sección transversal.

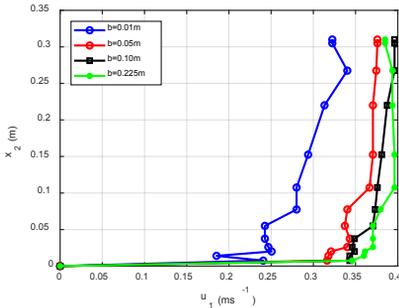


Fig. 4.2. Variación de los perfiles de velocidad en diferentes secciones en la vertical.

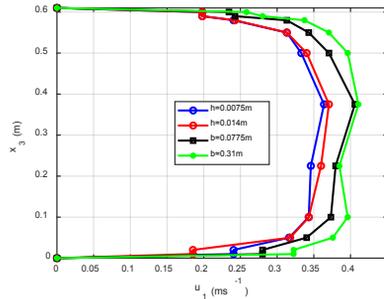


Fig. 4.3. Variación de los perfiles de velocidad en forma transversal.

Conclusiones

Se ha determinado la incertidumbre expandida del gasto instantáneo circulante en un canal con flujo a superficie libre, para un intervalo de confianza al 95%. El proceso de selección de las dovelas considerando ubicar el tubo Pitot, lo más cercano a la pared y después con ubicaciones siguiendo una relación de expansión logarítmica, demuestra que la incertidumbre en la estimación del gasto instantáneo es menor al $< 0.5\%$.

El estándar ISO-748 indica que es posible utilizar un método de puntos reducidos y el de mayor uso es considerar el método de un punto (apartado 7.1.5.3.2, ISO-178, 2007), que consiste en ubicar el medidor de velocidad a una profundidad de 0.6 por abajo de la superficie libre del agua.

Considerando este método y comparando con los resultados obtenidos, para este canal, se tiene un error sistemático de 12.1%. Por lo anterior, en caso de tener canales con una relación entre la profundidad y ancho $b/h \approx 2$, también denominados angostos, se recomienda no hacer de uso frecuente el método de un punto y se debe procurar aplicar a canales con una relación $b/h > 2$.

Referencias

Dirección General de Normas. (2018). *Norma Mexicana NMX-AA-179-SCFI-2018 Medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados*. Secretaría de Economía. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/552628/NMX-AA-179-SCFI-2018.pdf>

- European Committee For Standardization. (15 octubre 2007). ISO-178 *Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meter or floats*. Ginebra: International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/37573.html>
- Joint Committee for Guides in Metrology (2023). *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. https://www.bipm.org/documents/20126/194484570/JCGM_GUM-1/74e7aa56-2403-7037-f975-cd6b555b80e6
- Muste, M., Aberle, J. Admiraal, D., Ettema, R., Garcia, M. H., Lyn, D., Nikora y Rennie, C. (eds.). (2017). *Experimental Hydraulics: methods, instrumentation, data processing and management. Two volumen set (LAHR Monographs)*. CRC Press.

5 Análisis del flujo en canales prismáticos utilizando IA y soluciones de código abierto

Maritza Liliana Arganis Juárez, Faustino de Luna Cruz ,
Eliseo Carrizosa, Ramón Domínguez y José Luis Herrera

Instituto de Ingeniería, UNAM

Margarita Elizabeth Preciado Jiménez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

La determinación del flujo gradualmente variado en canales prismáticos es fundamental para resolver problemas de flujo a superficie libre permitiendo así el diseño y la evaluación de infraestructuras de drenaje. Recientemente, se ha investigado el uso de software de código abierto y herramientas de inteligencia artificial (IA) para modelar el perfil del flujo en estos canales. Aunque estas herramientas a menudo se consideran “cajas negras,” este estudio sugiere que la IA puede mejorar la precisión y eficiencia en los cálculos del flujo en canales prismáticos, lo que la convierte en una herramienta valiosa para proyectos de ingeniería hidráulica.

No obstante, la precisión en la estimación del perfil del flujo utilizando IA está condicionada por la calidad y exactitud de los datos de entrada, así como por los algoritmos empleados.

Por ello, es crucial validar y verificar los resultados obtenidos mediante comparaciones con mediciones reales u otros métodos de cálculo.

Este estudio empleó un software de código abierto desarrollado por la Universidad Estatal de San Diego, que utiliza el método del paso directo, junto con la IA Copilot© para crear programas en Python que aplican el método de Euler para resolver la ecuación diferencial del flujo gradualmente variado. Los resultados fueron validados mediante comparaciones con mediciones en un modelo de laboratorio de canal rectangular y con cálculos realizados por estudiantes utilizando una hoja de cálculo basada en el método del paso directo.

Los resultados iniciales sugieren que la IA requiere ajustes adicionales para optimizar la estimación del perfil del flujo en el canal analizado.

Palabras clave: canal prismático, flujo a superficie libre, uso de IA en hidráulica, obras de drenaje.

Introducción

Para el diseño y revisión de obras de drenaje es esencial el cálculo del flujo gradualmente variado en canales prismáticos. Recientemente, para calcular la estimación del perfil del flujo en estos canales se ha usado software libre y herramientas de inteligencia artificial (IA).

Aunque para muchos, la IA se percibe como una “caja negra”, es decir, se ingresan datos y se obtienen respuestas sin que los usuarios conozcan el proceso, se cree que puede mejorarse la precisión y eficiencia en los cálculos y análisis del flujo, lo cual la convierte en un recurso valioso en la ingeniería hidráulica. En este sentido, la precisión de los resultados que ofrece la IA dependerá de la calidad de los datos de entrada y de los algoritmos utilizados, por lo que es crucial validar los resultados con mediciones reales o comparaciones con otros programas.

En este capítulo se explica cómo se utilizó un programa de software libre desarrollado por la Universidad Estatal de San Diego y la herramienta Bing IA Chat®, ahora Copilot®, para crear un programa en Python que calcula el perfil del flujo en un canal prismático rectangular mediante el método de Euler. Los resultados se compararon con mediciones de un modelo de laboratorio y con cálculos realizados por estudiantes usando el método del paso directo en una hoja de cálculo. Los resultados muestran que la IA necesitó orientación para aproximarse a una solución físicamente coherente.

Técnicas para calcular la profundidad del flujo en canales prismáticos

El flujo gradualmente variado en canales es un fenómeno que se caracteriza por una variación suave y continua en la profundidad del flujo (o tirante) a lo largo del eje longitudinal del canal, manteniendo un régimen de flujo permanente. Según Sotelo (2002), esta variación implica que la velocidad del flujo cambia de manera gradual de una sección transversal a otra.

En canales prismáticos con sección compuesta, los perfiles del flujo gradualmente variado se pueden determinar mediante la integración de la ecuación dinámica del flujo. Para este tipo de canales es común emplear el número de Froude (tal como fue definido por Blalock y Sturm, 1987), como un parámetro clave para describir el comportamiento del flujo.

La ecuación diferencial que gobierna el flujo gradualmente variado en canales, basada en los principios de conservación de la masa y el momento, se expresa de la siguiente manera (Sotelo, 2002):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_f - S_o}{1 - Fr^2} \quad (1)$$

Donde:

y = profundidad del flujo en m

x = distancia a lo largo del canal

S_f = pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción, adimensional

S_o = pendiente del canal, adimensional

Fr = número de Froude, que es una medida adimensional de la velocidad del flujo en relación con la velocidad de la onda de gravedad en el canal.

El método numérico del paso directo, también conocido como método directo por pasos, es una técnica eficaz para calcular la profundidad del flujo en canales suficientemente largos. Este método permite la determinación de la profundidad del flujo (tirante) desde un punto aguas arriba o aguas abajo, dependiendo de la pendiente del canal. La esencia del método radica en la aplicación iterativa de la ecuación de la energía específica o la ecuación de la pendiente de la línea de energía para avanzar en el cálculo de una sección a la siguiente. Sotelo (2002) detalla la formulación y la ecuación de recurrencia que subyace a este método, lo que permite su aplicación en una amplia gama de configuraciones de canales.

El método de Euler es un procedimiento numérico ampliamente utilizado para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden. Este método se basa en la aproximación de la solución de la ecuación diferencial mediante pasos discretos a lo largo del intervalo de interés. Se utiliza la integración trapezoidal con truncamiento para aproximar la derivada de la función incógnita. Según Chapra y Canale (2015), la formulación del método de Euler se expresa como sigue:

$$y' = f(x, y), \text{ sujeta a } y(x_0) = y_0 \quad (2)$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta x f(x_i, y_i), i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

El valor de la función y se determina en el intervalo de valores $[x_0, x_n]$.

Aplicación de nuevas tecnologías a problemas de hidráulica y sus condicionantes

Con el propósito de automatizar el cálculo del perfil de flujo gradualmente variado en un canal rectangular, se utilizó un programa de software libre desarrollado por la Universidad Estatal de San Diego (USD), disponible en internet (Ponce, 2023), que emplea el método del paso directo, junto con la herramienta Bing IA Chat®, para desarrollar un programa en lenguaje Python que calcula el perfil del flujo en un canal prismático con sección rectangular.

Este programa integra tanto el método del paso directo como el método de Euler para resolver la ecuación diferencial asociada al flujo gradualmente variado, ajustándose a las condiciones geométricas y de flujo especificadas. El programa desarrollado es capaz de calcular el perfil del flujo para un canal rectangular con parámetros geométricos y condiciones iniciales definidas, permitiendo una comparación entre los resultados obtenidos mediante la simulación y los datos experimentales.

En este estudio los resultados obtenidos con el programa fueron comparados con mediciones realizadas en un modelo de laboratorio de un canal rectangular, así como con cálculos realizados por estudiantes que emplearon el método del paso directo en una hoja de cálculo.

En el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se efectuó una práctica para calcular el perfil del flujo de un canal rectangular con los siguientes datos:

Dato estimado que circula por el canal fue de $Q_n = 0.0248 \text{ m}^3/\text{s}$

$y_n = 0.192 \text{ m}$

$S_0 = 0.00128$ tirante crítico

$y_c = 0.0116 \text{ m}$

$Q_c = 0.0192 \text{ m}^3/\text{s}$

$S_c = 0.0046$

Con el programa de la Universidad de San Diego que aplica el método del método de paso directo se consideraron 50 intervalos de cálculo en el ensayo cero, posteriormente se consideraron 100 intervalos. El programa estima el cadenamiento x . Con el programa generado por la IA se propuso un

$\Delta x = -0.2$ en el caso del método de Euler y para el método de paso directo se tomó el valor $\Delta x = 1$ m.

Resultados y discusión

En la figura 5.1 se hace la comparación entre los datos medidos en el laboratorio, calculados por lo estudiantes con el método del paso directo, los calculados por el programa de la Universidad de San Diego, y los calculados con el programa realizado con la IA.

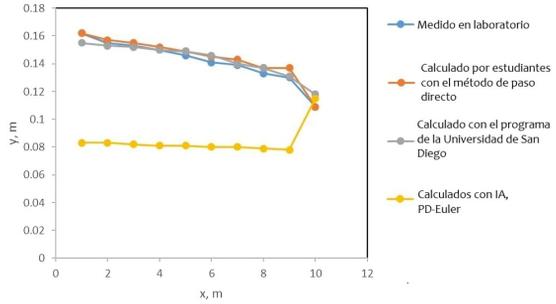


Fig. 5.1. Comparación del perfil medido y calculados.

La tabla 5.1 contiene la información trazada.

Tabla 5.1. Datos medidos y calculados de la profundidad del agua en canal rectangular de laboratorio. Ensayo cero					
x	y _{med} [m]	y _{calc lab} [m]	y _{calc IA} [m]	sección x [m]	y _{calc USD} [m]
10	0.109	0.109	0.115	10	0.118
9	0.13	0.137	0.078	9	0.131
8	0.133	0.137	0.079	7.9	0.137
7	0.139	0.143	0.080	7.1	0.14
6	0.141	0.145	0.080	5.1	0.146
5	0.146	0.149	0.081	3.8	0.149
4	0.15	0.152	0.081	3.1	0.15
3	0.153	0.155	0.082	2.3	0.152
2	0.155	0.157	0.083	1.5	0.153
1	0.162	0.162	0.083	0.6	0.155

Fuente: elaboración propia y de datos de práctica estudiantil en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería, UNAM, 2024.

De la figura 5.1 y tabla 5.1 se observa que los resultados dados por el software libre de la Universidad de San Diego son similares a los medidos de laboratorio y calculados por los estudiantes con ayuda de una hoja de cálculo, con diferencias de entre el 0 y casi 4% aproximadamente, mientras que el resultado hasta ahora obtenido con el programa realizado por la IA utilizada, reporta diferencias de entre el 5 y casi 48%, por lo que aún se realizaron ajustes al programa desarrollado por la IA, ya que el número de Froude resulta mayor que uno para las profundidades que reporta.

Al proponer el cálculo con el método del paso directo y la IA, con las ecuaciones utilizadas en el experimento de laboratorio, se obtuvo un programa modificado y se recalculó el perfil con el programa de la Universidad de San Diego, con los resultados indicados en la tabla 5.2 y la figura 5.2.

Tabla 5.2. Datos medidos y calculados de la profundidad del agua en canal rectangular de laboratorio					
x	y _{medido} [m]	y _{calc lab} [m]	y _{IAPD1} [m]	y _{USD} [m]	y _{IA PD2} [m]
10	0.109	0.109	0.11	0.11	0.1160
9	0.13	0.137	0.108	0.115	0.1193
8	0.133	0.137	0.106	0.118	0.1223
7	0.139	0.143	0.104	0.121	0.1250
6	0.141	0.145	0.102	0.123	0.1275
5	0.146	0.149	0.099	0.126	0.1298
4	0.15	0.152	0.096	0.127	0.1319
3	0.153	0.155	0.093	0.129	0.1339
2	0.155	0.157	0.089	0.13	0.1358
1	0.162	0.162	0.085	0.132	0.1376

Fuente: Elaboración propia, 2024

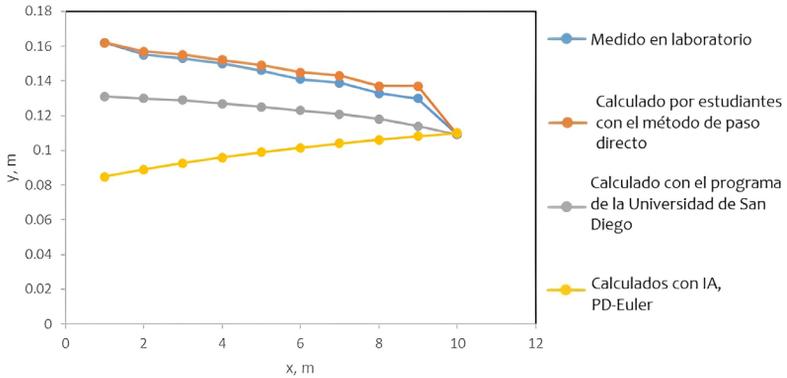


Fig. 5.2. Comparación del perfil medido y calculados. Ensayo 1.

De la figura 5.2 se observa que la IA nuevamente reporta valores decrecientes de la profundidad, mientras que con el método de la Universidad de San Diego los valores disminuyen respecto al ensayo de la figura 5.1, pero sí se observa un patrón similar en el perfil del flujo respecto a lo efectuado en el laboratorio. La ventana de ingreso de datos al programa de la Universidad de San Diego se observa en la figura 5.3.

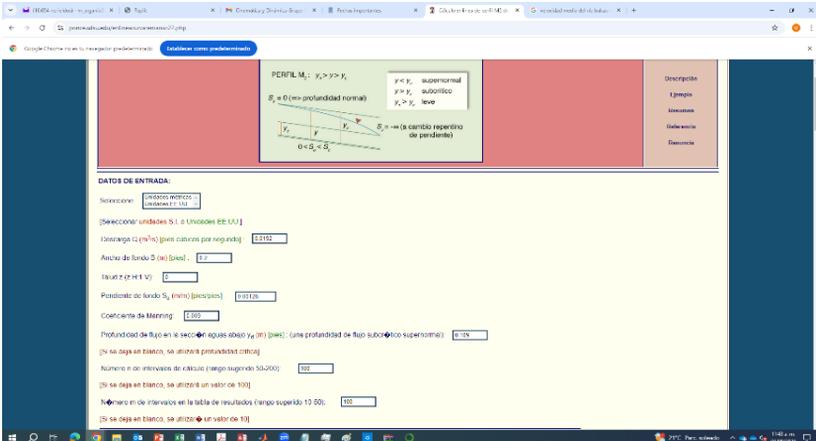


Fig. 5.3. Ingreso de datos en el programa de la USD. Fuente: interfaz del programa de la USD de Ponce (2023) con ingresos de datos propios, 2024.

Al darle mayor información a la IA de los datos para las condiciones de tirante normal y especificando que el tirante debía ser creciente y partir del tirante crítico, se obtuvieron los resultados que se destacan en la última columna de la tabla 5.2, y reportados en la figura 5.4. El programa modificado se puede consultar con los autores de este trabajo.

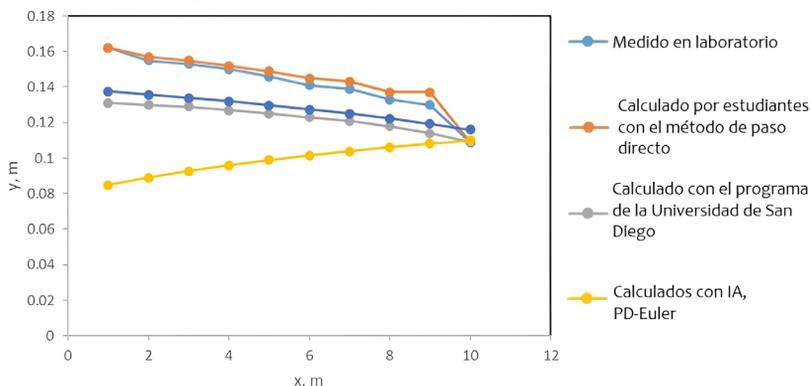


Fig. 5.4. Comparación del perfil medido y calculados. Ensayo 2.

De la figura 5.4 se observa que con el método de paso directo tanto el resultado de la IA como el de la USD son similares, con errores relativos promedio del 4%. Lo que se observa es la ligera variación en la profundidad inicial considerada, que también se observa respecto a los datos de Laboratorio. (Véanse tablas 5.1 y 5.2.)

El estudio muestra que la combinación de IA y técnicas numéricas tradicionales no solo mejora la precisión de los cálculos, sino que también optimiza la eficiencia en la resolución de problemas hidráulicos complejos.

Conclusiones

En el presente capítulo se ha demostrado la capacidad de la IA para abordar y resolver problemas complejos de hidráulica, como la estimación del perfil de flujo gradualmente variado en canales prismáticos. Uno de los principales beneficios de utilizar IA en este contexto es su capacidad para

manejar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos iterativos con rapidez y precisión.

En comparación con los métodos manuales o semiautomáticos, la IA permite realizar múltiples simulaciones en menor tiempo, lo que facilita la optimización de diseños hidráulicos y la evaluación de distintas condiciones operativas. Además, la IA ofrece flexibilidad en la implementación de modelos personalizados, como se evidenció en el desarrollo del programa en Python que fue capaz de ajustarse a las condiciones específicas del canal rectangular estudiado. Esta adaptabilidad es crucial en la ingeniería hidráulica, donde las condiciones del flujo pueden variar considerablemente dependiendo de factores como la geometría del canal, la pendiente, y las características del flujo.

Sin embargo, este estudio también subraya la importancia de la supervisión humana en el proceso. Aunque la IA puede automatizar gran parte del cálculo y análisis, la interpretación de los resultados y la toma de decisiones finales deben realizarse con la experiencia y el criterio de ingenieros especializados. La validación de los resultados obtenidos mediante IA, comparándolos con mediciones de laboratorio y otros métodos de cálculo, es esencial para asegurar la confiabilidad y precisión de las soluciones propuestas.

Referencias

- Ocaña-Fernández, Y., Valenzuela-Fernández, L.A. y Garro-Aburto, L.L. (2019). *Inteligencia artificial y sus implicaciones en la educación superior*. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
- Sotelo Ávila, G. 2002. "Hidráulica de Canales. Facultad de Ingeniería", UNAM, México.
- Sotelo Ávila, G. 2015. "Flujo gradualmente variado en canales de sección compuesta". *Tecnología y Ciencias del Agua*, 16(1), 20215, pp. 57-62.
- Universidad Nacional de Ingeniería. 2013. "Flujo gradualmente variado". Notas de Clase de Hidráulica II, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú.

6 ¿Debe México construir más presas de almacenamiento y derivación? ¿Debe destruir algunas existentes?

Humberto Juan Francisco Marengo Mogollón
Comisión Nacional del Agua

Felipe Ignacio Arreguín Cortés
Instituto de Ingeniería, UNAM

Resumen

La intensa sequía que afrontó México durante los últimos tres años demostró la necesidad de contar con más infraestructura de almacenamiento de agua. Por otra parte, al comenzar la temporada de lluvias e inundaciones, la demanda social pide infraestructura para proteger a las comunidades de esos fenómenos. Las principales obras que cumplen ambas funciones son las presas de almacenamiento y derivación. A pesar de ello, existen grupos que desde hace años se oponen a la construcción de

presas o incluso proponen la demolición de las existentes.

La decisión de construir o destruir presas en México es compleja y depende de una serie de factores ambientales, económicos, sociales y políticos que hay que tomar en consideración.

En el siguiente capítulo se presentan algunos argumentos a favor y en contra de la construcción y demolición de presas, así como consideraciones importantes para la toma de decisiones.

Palabras clave: presas de almacenamiento y derivación, construcción, destrucción, infraestructura.

Introducción

La intensa sequía que afrontó México durante los últimos tres años demostró la necesidad de contar con más infraestructura de almacenamiento de agua. De la misma manera, en el momento en que empezaron las lluvias y las inundaciones, la sociedad pidió infraestructura que la proteja de estos fenómenos. Las principales obras que cumplen esta función son las presas de almacenamiento y derivación. Sin embargo, existen corrientes de pensamiento que desde hace años se oponen a la construcción o incluso proponen la demolición de presas (Comisión Mundial de Represas, 2025).

La decisión de construir o destruir presas en México es compleja y depende de una serie de factores ambientales, económicos, sociales y políticos, englobados todos ellos bajo la demanda de una población en crecimiento constante y los impactos del cambio global (González y Arreguín, 2021), que exacerban los fenómenos extremos como sequías e inundaciones. A continuación, se presentan argumentos a favor y en contra de la construcción y demolición de presas, así como algunas consideraciones importantes para la toma de decisiones.

Argumentos a favor de la construcción

Las presas de almacenamiento y derivación han jugado un papel fundamental en el desarrollo de la humanidad en la medida que los asentamientos humanos se fueron ubicando lejos de ríos y lagos, fuentes originales de su abastecimiento, pues permiten una distribución controlada del agua en las estaciones secas garantizando el suministro aún en épocas de sequía. En nuestro país sobran los ejemplos. Los casos más recientes en los cuales la sequía impactó a las áreas metropolitanas de Monterrey y de la Ciudad de México, lograron un abastecimiento controlado por medio de las presas El Cuchillo, La Boca y Cerro Prieto en el primer caso, y en el segundo, por las que forman el Sistema Cutzamala.

Uno de los beneficios más directos de las presas es la regulación del caudal de los ríos. Durante la época de avenidas, las presas protegen a las comunidades ubicadas aguas abajo, salvando vidas humanas y protegiendo tierras agrícolas e infraestructura urbana. La planicie tabasqueña ha sido protegida durante años por el sistema de presas del Sistema Grijalva.

Las presas también son importantes para la generación de electricidad en forma limpia, renovable, estable y confiable. Sin duda contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En México un ejemplo emblemático es el sistema de presas del río Grijalva.

Desde luego las presas son generadoras de desarrollo económico local y regional. En torno a ellas se ha dado el mayor crecimiento de actividades agrícolas, han impulsado el desarrollo industrial y en muchos casos han fomentado el turismo. Todo ello ha favorecido la generación de empleos directos e indirectos.

Argumentos en contra de la construcción

No puede negarse que la construcción de una presa altera los ecosistemas acuáticos y terrestres y que la alteración del flujo de agua natural modifica su calidad, los ciclos de nutrientes y los hábitats de numerosas especies. La transformación del entorno natural para construir una presa impacta la flora y fauna locales. En México las manifestaciones de impacto ambiental y las correspondientes medidas de mitigación han sido cada vez más estrictas para atender este problema.

Un impacto más de este proceso es el desplazamiento de las comunidades que son afectadas por todas las obras de la presa (cortina, vaso de almacenamiento, vertedor, obras accesorias, e incluso aquellas que se construyen como caminos de acceso o bancos de materiales), lo cual afecta a las comunidades porque cambia su forma de vida tradicional, aun cuando se les ofrezcan alternativas de reubicación, en apariencia mejores que las condiciones en las que vivían.

Otro problema que se presenta es el incremento de la evaporación de agua, pues las áreas de los embalses de las presas expuestas al sol aumentan las tasas de evaporación de este recurso. Desde luego que también las presas implican riesgos de seguridad que se pueden reducir con sistemas de monitoreo y mantenimiento adecuados (Marengo, 2015). Finalmente las inversiones para la construcción y mantenimiento de estas obras han sido argumentos utilizados recientemente por aquellos que se oponen a su construcción.

En la tabla 6.1 se resumen los argumentos en contra y a favor de la construcción de presas.

Tabla 6.1 Argumentos en la construcción de presas	
A favor	En contra
Abastecimiento de agua	Impacto ambiental
Control de inundaciones	Desplazamiento de comunidades
Generación de energía	Pérdida de biodiversidad
Desarrollo económico	Evaporación de agua

Fuente: elaboración propia, 2025.

Argumentos a favor de la destrucción

En años recientes grupos ecologistas y asociaciones internacionales han promovido la destrucción de las presas con argumentos variados como los que se comentarán. En primer lugar, consideran que la eliminación de presas permite que los ríos recuperen sus dinámicas hídricas naturales y restauren hábitats requeridos por la fauna y flora local, al reestablecer la oxigenación y circulación de sedimentos naturales. También piensan que de alguna manera se hace una reparación de daños sociales con las comunidades que fueron desplazadas para construir las presas y que ahora podrían recuperar sus tierras originales. Se argumenta que la remoción de las presas reduce el riesgo de los impactos de falla de estas, aumentando la seguridad de las poblaciones. Finalmente, se dice que con estas acciones las comunidades podrían recuperar economías sustentables basadas en la pesca y el turismo.

Argumentos en contra de la destrucción

Quienes están en contra de destruir las presas argumentan que hacerlo implica la pérdida de beneficios económicos que han proporcionado estas estructuras como el abastecimiento de agua, la generación de energía, el control de inundaciones y la reducción del recurso para la agricultura o la industria.

Debe anotarse que demoler una presa requiere inversiones muy altas, que en muchos casos pueden superar los beneficios que se esperan en el largo plazo (Arreguín, 2021). Además, el impacto ambiental de esta acción es muy grande pues debe considerarse que en torno a estas obras se han creado nuevos ecosistemas y que las estrategias de restauración ecológica pueden ser muy costosas. Por ejemplo, el manejo de los sedimentos acumulados

durante muchos años puede ser complejo pues afectará a los ecosistemas aguas abajo y a los del fondo del mismo vaso. Lo mismo podría decirse de la calidad del agua y de la flora y fauna propia de la presa.

Además, el impacto a la economía de las comunidades desarrolladas en torno a los embalses, como actividades turísticas, pesqueras y recreativas en general puede ser muy grande.

Debe señalarse también que las presas que se han decidido destruir, en la gran mayoría de los casos, son presas pequeñas y, por lo anteriormente comentado, no sucede con las grandes presas.

En la tabla 6.2 se presentan los argumentos en contra y a favor de la destrucción de presas.

Tabla 6.2 Argumentos en la destrucción de presas	
A favor	En contra
Restauración de ecosistemas	Pérdida de beneficios económicos
Reparación de daños sociales	Costos elevados
Mejora de la calidad del agua	Riesgo de inundaciones

Fuente: elaboración propia, 2025.

Conclusiones

La decisión de construir o destruir presas en México debe basarse en un análisis exhaustivo y equilibrado de todos los factores involucrados. Mientras que las presas pueden ofrecer importantes beneficios, también pueden causar impactos significativos. Un enfoque integral y participativo es esencial para asegurar que las decisiones tomadas beneficien tanto al medio ambiente como a la sociedad. Sin embargo, debe considerarse que el impacto del cambio climático global en el mundo y en particular en México cada día es mayor, y que aunado al crecimiento poblacional la demanda de agua de todos los usuarios se incrementa día a día. Nuestro país no puede darse el lujo de no construir la infraestructura necesaria para administrar los cada día más escasos recursos hídricos en beneficio de la población mexicana.

A nivel mundial, se ha establecido una declaratoria por parte de diversas agencias como son el ICOLD (Comisión Mundial de Grandes Presas), el ICID (Comisión Internacional de Riego y Drenaje), la IHA (Asociación

Internacional de Hidrogeneración) y la IWRA (Asociación Internacional de Recursos del Agua), que la única forma de combatir los efectos del cambio climático es con más infraestructura, eficiente y efectiva para ofrecer agua regulada y de mayor calidad a la población, que nos permita ofrecer proyectos sustentables y sostenibles.

Recomendaciones

Toda vez que se han presentado argumentos a favor y en contra tanto de la destrucción como la construcción de presas, se recomienda.

- Reactivar el programa de revisión del riesgo que guardan todas las presas de almacenamiento y derivación en México.
- Revisar y, en su caso, rediseñar los vertedores, obras de toma y cortinas por efectos del impacto del cambio climático.
- Efectuar reparaciones y adecuaciones detectadas en los dos pasos anteriores.
- Reactivar los programas de la Conagua y la CFE de ubicación de nuevas presas para satisfacer la demanda de agua y proteger a la población ante los impactos de los eventos extremos.
- Evitar que nuestro país se incrementen los grupos que promuevan la demolición de presas construidas.
- Emplear la tecnología de punta existente (Big Data, Blockchain, etc.) y sobre todo la IA para dar el paso cualitativo que requiere la ingeniería mexicana en materia de diseño, construcción, operación y mantenimiento de las presas de almacenamiento y derivación. Por ejemplo, los procedimientos empleados actualmente para calcular las avenidas de diseño se basan en series hidrológicas históricas, que en caso de ser completas y suficientes, pueden no presentar las condiciones reales de la cuenca por al menos dos razones del cambio global: los procesos de deforestación, urbanización, ampliación de la frontera agrícola, y la construcción de infraestructura, aguas arriba y abajo de la cortina; y el cambio climático. Es decir, las revisiones de obras actuales y las proyecciones al futuro serán cada vez menos confiables basadas únicamente en datos históricos, pues deben ajustarse con criterios de cambio global y herramientas tan poderosas como las citadas anteriormente harán que esta labor sea más precisa.

Referencias

- Arreguín Cortés, F. (2021). *Obras hidráulicas*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 507 pp. Comisión Mundial de Represas. email: info@dams.org www.dams.org. 2025.
- González Villarreal, F. J. y Arreguín Cortés, F. I. (2021). *Impacto del cambio global sobre las presas de almacenamiento y derivación*. Instituto de Ingeniería, UNAM. <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073047951e.2021>
- Marengo Mogollón, H. (2015). Consideraciones acerca de la seguridad de presas de tierra y enrocamiento (con énfasis ante avenidas de diseño). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(1), 61-75. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/802>.

7 Estudio de rotura de una presa de jales en la zona centro-norte de México

Alma Itzel Rivera Flores

José Antonio Bonilla Porras

Knight Piésold Consulting S.A. de C.V.

Resumen

El análisis y modelado de rotura de presas de jales se utiliza en la industria minera para evaluar las consecuencias potenciales ante la ocurrencia de una falla hipotética en un bordo. La Asociación Canadiense de Presas (CDA) establece directrices para el análisis del rompimiento de presas de este tipo que fueron utilizados por Knight Piésold en el modelado de la rotura de una presa de jales ubicada en la zona centro-norte de México. El sitio se caracteriza por un clima semiárido templado con una temporada de lluvias entre julio y septiembre. El depósito de jales está limitado por el terreno natural en sus extremos sur y oeste, y por el bordo analizado al norte y este.

El análisis se basa en la definición de distintos escenarios hidrológicos

al momento de la falla hipotética, la determinación del modo y mecanismo de falla y el análisis de los volúmenes de agua y jales que potencialmente escurrirían en el caso de una rotura. La modelación se desarrolla en dos partes principales: análisis de la brecha (geometría, tiempo de formación e hidrograma de salida), y la propagación de la inundación hacia aguas abajo. Los modelos se implementaron en el software FLO-2D.

Los resultados consisten, principalmente, en la generación de mapas de inundación y riesgo. La aplicación de este análisis se toma como guía para el desarrollo de planes de emergencia y la clasificación de las estructuras, basada en la evaluación de daños potenciales.

Palabras clave: presas de jales, análisis de rotura de presa, climatología, inundación, evaluación de daños potenciales, mapas de inundación y riesgo, desarrollo de planes de emergencia.

Introducción

La rotura de presas de jales supone un riesgo significativo, con consecuencias potenciales que van desde daños a comunidades aledañas hasta impactos ambientales severos. En este capítulo se presenta un estudio que analiza la posible rotura de una presa de jales ubicada en la zona centro-norte de México, considerando las características del material almacenado y las condiciones hidrológicas de la región.

El sitio se caracteriza por un clima semiárido templado, con vegetación escasa y una temporada de lluvias concentrada entre julio y septiembre. La topografía aguas abajo es relativamente llana, con pocos drenajes definidos, y una inclinación predominante de sur a norte. El principal curso de agua fluye, en general, hacia el noroeste.

La presa cuenta con una altura máxima de 24 m, una capacidad de almacenamiento de jales de hasta 850 000 m³ y una capacidad máxima de agua de 68 000 m³. Su diseño no incluye un vertedor de excedencias, lo que plantea un desafío adicional en la gestión del riesgo. A través de la aplicación de un modelo numérico, se estimaron las consecuencias potenciales de una rotura, lo cual aportó información valiosa para la gestión del riesgo y la implementación de medidas preventivas.

Materiales y métodos

En el estudio se establecieron los siguientes objetivos para evaluar una posible rotura y su impacto:

- Definir de escenarios hipotéticos de falla.
- Modelar numéricamente la brecha, incluyendo la estimación del hidrograma de salida en caso de falla.
- Realizar un modelado numérico bidimensional de la inundación resultante.
- Mapear e identificar las extensiones, profundidades, velocidades y peligros de la inundación aguas abajo.
- Estimar las pérdidas potenciales de vidas humanas (PLL) en la zona afectada.

Según la Asociación Canadiense de Presas (CDA, 2021), se establecen al menos dos escenarios hidrológicos para el análisis: condiciones extremas, y condiciones promedio. En el primer escenario se asume que la presa está llena a su máxima capacidad, tanto de jales como de agua, en el momento de la falla. Además, se considera que el cauce aguas abajo transporta un gasto asociado con un periodo de retorno de 100 años. En el segundo escenario se considera que la presa está llena a su capacidad máxima de jales; sin embargo, la superficie del agua se encuentra en su nivel promedio por encima de los jales en el momento de la falla. Asimismo, se asume que el cauce aguas abajo conduce un escurrimiento medio.

Los niveles de agua al interior del depósito al momento de la falla, los volúmenes almacenados y los gastos en el cauce aguas abajo para cada escenario se presentan en la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Condiciones asumidas al momento de la falla para distintos escenarios		
Escenario hidrológico	Condiciones extremas	Condiciones promedio
Nivel máx. de agua (msnm)	2215.1	2213.1
Vol. almacenado agua (m ³)	68 000	8000
Vol. almacenado jales (m ³)	850 000	850 000
Gasto cauce aguas abajo (m ³ /s)	186.0	0.0

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Con base en cada escenario hidrológico se determinó el volumen de jales que sería liberado en caso de una falla hipotética. La metodología utilizada se basa en la construcción de un cono de falla alrededor de la brecha proyectada, asumiendo una pendiente del 5% (figura 7.1). Bajo este enfoque se considera que únicamente el volumen de jales situado por encima del cono de falla sería liberado en caso de la rotura del bordo. Asimismo, independientemente del escenario hidrológico, se asume que el volumen de agua almacenado se

vertería completamente a través de la brecha. El volumen total liberado se obtiene como la suma del volumen de jales por encima del cono de falla, el volumen de agua almacenada, y el volumen del material estructural del bordo que se perdería como consecuencia de la falla.

La selección del modo y mecanismo de falla se determinó con base en los análisis geotécnicos del bordo, lo cual concluyó que la falla hipotética sería consecuencia de un colapso inducido por la falla de la cimentación.

Si bien se evaluaron diferentes ubicaciones potenciales para la ocurrencia de la brecha, se seleccionó el extremo oriente del bordo debido a que representa la ruta más directa hacia infraestructura relevante (figura 7.1). La geometría de la brecha se estimó utilizando diversas ecuaciones empíricas de regresión, desarrolladas a partir del análisis de fallas históricas de presas. Además, se aplicaron criterios técnicos reconocidos, como los propuestos por USBR (1982) y Von Thun y Gillette (1990). El ancho de la brecha varía en función de la profundidad y de los volúmenes liberados en cada escenario. La metodología asume que la brecha presenta una geometría rectangular.

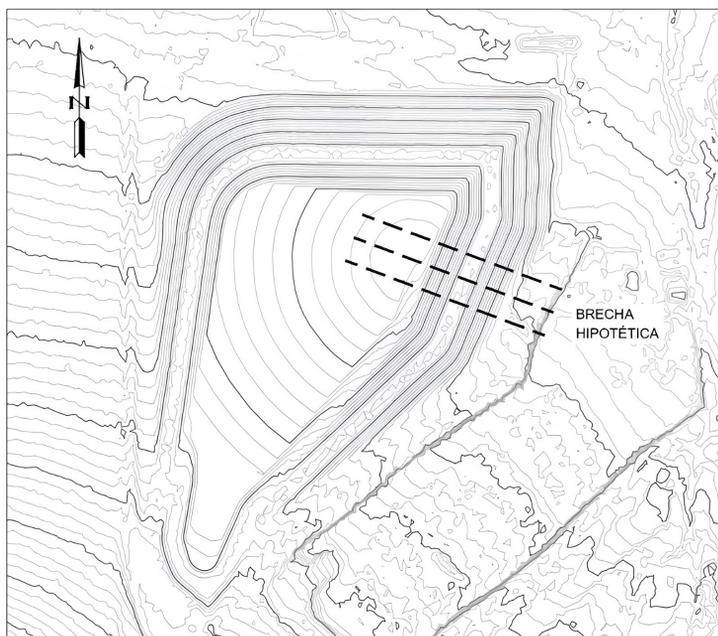


Fig. 7.1. Localización de la brecha hipotética en el depósito de jales.

Los tiempos de formación de las brechas se estimaron utilizando ecuaciones de regresión disponibles en la literatura, como la propuesta por USBR (1982).

Para la modelización numérica de la brecha se empleó el módulo BREACH del software FLO-2D (2018), el cual simula la erosión progresiva a través del cuerpo de la presa y genera el hidrograma de salida resultante de la rotura. La modelización numérica de la inundación se realizó también con FLO-2D (2018), empleando la rutina de flujo no newtoniano, que considera los esfuerzos de fluencia y la viscosidad del fluido como funciones de la concentración de sólidos a lo largo del cauce en dirección hacia aguas abajo.

Los resultados de la simulación se analizaron a lo largo de un alineamiento de referencia de 12 km aguas abajo de la presa, con estimaciones de la inundación registradas en intervalos de 1 km. Para la representación de la topografía, el modelo utilizó una malla de cálculo con espaciado de 20 m y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.06. Cabe destacar que en fluidos no newtonianos el principal parámetro de resistencia al flujo es la viscosidad, más que la rugosidad de Manning.

Para los escenarios hidrológicos considerados se asumió que el cauce aguas abajo transporta un caudal correspondiente a la avenida de 100 años en condiciones extremas y el caudal medio anual en condiciones promedio. Debido a la falta de datos hidrológicos en la región, los caudales de 100 años se estimaron mediante modelos de precipitación-escorrentía. Los resultados indicaron que, en condiciones extremas, el gasto podría alcanzar hasta $186 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en condiciones promedio se estima un gasto cercano a $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Una vez identificada la población en riesgo (PAR, por sus siglas en inglés), la pérdida potencial de vidas (PLL, por sus siglas en inglés) para cada escenario se estimó utilizando la *Reclamation Consequence Estimating Methodology* (RCEM), descrita en USBR (2015). Este método se basa en datos de fallas históricas de presas de agua e incorpora relaciones de la tasa de mortalidad en función del producto máximo entre la profundidad y la velocidad del flujo, lo que permite identificar el peligro máximo de inundación.

Según CDA (2021), la evaluación de la pérdida de vidas humanas en un evento de rotura de presa debe realizarse con base en impactos incrementales. Para ello, se comparan las muertes esperadas en un evento de inundación natural con un periodo de retorno de 100 años con las pérdidas estimadas en un escenario combinado (rotura de la presa más inundación natural), restando

ambas cantidades. Este enfoque es consistente con las recomendaciones del Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (ICMM, 2020).

Resultados y discusión

Con base en el análisis de ecuaciones empíricas, las características de la brecha para el escenario de condiciones hidrológicas extremas quedan definidas por:

- Altura: 17.0 m
- Ancho: 45.0 m
- Tiempo de formación: 0.4 horas

Siguiendo las recomendaciones de CDA (2021) e ICMM (2020), se estimó el volumen total liberado de 629 000 m³, compuesto por:

- 520 000 m³ de jales almacenados por encima del cono de falla
- 68 000 m³ de agua contenida en el depósito al momento de la rotura
- 41 000 m³ de material estructural del bordo

Los resultados del modelo de brecha indican que el gasto pico de salida alcanza 730 m³/s, a las 0.30 horas después del inicio de la rotura. El hidrograma de salida tiene una duración total de 0.65 horas (figura 7.2), con una concentración de sólidos estimada en 43%.

El modelo de inundación aguas abajo sugiere una rápida atenuación del gasto pico: 95% al primer kilómetro, del 97% al segundo kilómetro y un 99% a los 12 kilómetros aguas abajo. Los tirantes máximos varían entre 0.3 m y 1.3 m, mientras que las velocidades del flujo oscilan entre 0.3 m/s y 1.4 m/s.

El análisis de PAR indica que aproximadamente 5337 personas podrían verse afectadas por la inundación natural correspondiente a un periodo de retorno de 100 años. No obstante, en este escenario (sin considerar la rotura de la presa), no se identificaron PLL.

Al incluir la contribución del evento en condiciones hidrológicas extremas, se estima un incremento de la PAR en 53 personas. A pesar de ello, las estimaciones indican que no habría pérdidas de vidas humanas, aunque se prevé la inundación infraestructura cercana al depósito y de varias comunidades aguas abajo.

Es importante destacar que la contribución del volumen liberado por la falla del bordo no tendría un impacto significativo sobre las consecuencias del evento de tormenta. Esto se observa en el incremento del área de la mancha de inundación, que pasa de 55.3 km^2 a 55.8 km^2 .

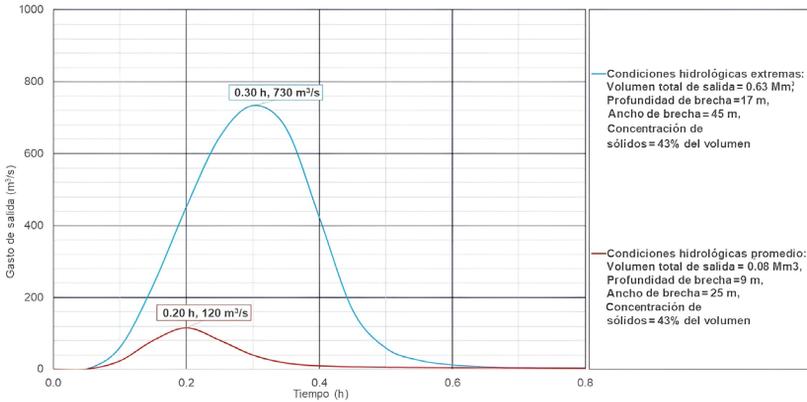


Fig. 7.2. Hidrogramas de salida de la brecha en diferentes escenarios.

A partir del análisis de ecuaciones empíricas se determinaron las siguientes características de la brecha para el escenario de condiciones hidrológicas promedio:

- Altura: 9.0 m
- Ancho: 25.0 m
- Tiempo de formación: 0.3 horas

Con base en las recomendaciones de CDA (2021) e ICM (2020), se estimó el volumen total liberado de 82000 m^3 , compuesto por:

- 68000 m^3 de jales almacenados por encima del cono de falla
- 8000 m^3 de agua almacenada en el depósito al momento de la falla
- 6000 m^3 de material estructural del bordo

Los resultados del modelo de brecha indican que el gasto pico de salida alcanza $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ocurriendo 0.20 horas después del inicio de la rotura. El hidrograma de salida tiene una duración total de 0.40 horas (figura 7.2), con una concentración de sólidos estimada en 43%, similar al escenario de condiciones extremas.

El modelo de inundación aguas abajo sugiere una atenuación casi total del gasto pico dentro del primer kilómetro, lo que implica una disipación rápida del flujo. En este escenario, tanto tirantes máximos como velocidades de flujo son prácticamente nulos.

Al incorporar la contribución de este evento al escurrimiento medio se estima un incremento nulo en la PAR, lo que indica que no habría pérdidas potenciales de vida en estas condiciones. Si bien es probable que la infraestructura cercana al depósito se vea afectada por inundaciones, no se esperan impactos significativos en las comunidades ubicadas aguas abajo.

Conclusiones

Knight Piésold realizó el estudio de rotura de presa para un depósito de jales en la zona centro-norte del país cumpliendo con los cinco objetivos establecidos. El estudio se fundamentó en la definición de dos escenarios hidrológicos: la identificación del modo y mecanismo de falla a partir de estudios geotécnicos, y la estimación de volúmenes liberados en caso de rotura. Estos resultados se integraron como datos de entrada en un modelo numérico bidimensional, estructurado en dos componentes principales: brecha e inundación.

En el escenario de condiciones hidrológicas extremas, los resultados indican inundaciones en infraestructuras cercanas al depósito, así como en algunas comunidades próximas. Por su parte, en el escenario de condiciones hidrológicas promedio, la inundación de algunas infraestructuras cercanas al depósito es probable, pero no se esperan afectaciones en las comunidades.

Los resultados de este tipo de estudios son fundamentales para fortalecer la capacidad de respuesta de las empresas mineras, las autoridades y las comunidades frente a eventos potencialmente catastróficos. Es esencial que este tipo de análisis forme parte de los proyectos en sus distintas etapas, dentro del marco de las buenas prácticas en la industria minera nacional.

Referencias

- Canadian Dam Association. (2021). *Technical bulletin: Tailings dam breach analysis*.
FLO-2D Software, Inc. (2018). *FLO-2D reference manual and software*.

- International Council on Mining & Metals. (2020). *Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera*. ICMM-UN Environment Programme-PRI. https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf
- United States Bureau of Reclamation. (1982). *Guidelines for defining inundated areas downstream from Bureau of Reclamation dams*. (Reclamation Planning Instruction No. 82-11).
- United States Bureau of Reclamation. (2015). *RCEM—Reclamation consequence estimating methodology, guidelines for estimating life loss for dam safety risk analysis*. United States Department of the Interior.
- Von Thun, J. L., y Gillette, D. R. (1990). *Guidance on breach parameters*. [Documento interno no publicado]. U.S. Bureau of Reclamation.

8 Evaluación ambiental y de estabilidad en el entorno de la presa de jales Dos Carlos en Mineral de la Reforma, Hidalgo

Humberto Iván Navarro Gómez, Christopher Contreras López
y Mauricio Guerrero Rodríguez
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Carmen Julia Navarro Gómez
Universidad Autónoma de Chihuahua

Resumen

La actividad minera ha sido un pilar económico en México desde tiempos de la Colonia, especialmente en regiones como el estado de Hidalgo. Sin embargo, esta actividad deja una huella ambiental significativa debido a la generación de residuos conocidos como jales. Estos desechos, compuestos por materiales finos y metales pesados, se almacenan en estructuras denominadas presas de jales.

La presa de jales Dos Carlos, ubicada en el municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo, es una de las más prominentes en la región y representa un foco de atención debido a su poten-

cial impacto ambiental y riesgos asociados con su estabilidad estructural.

Este capítulo describe un estudio que tiene como objetivo evaluar detalladamente la estabilidad estructural de la presa Dos Carlos y su impacto ambiental en las zonas circundantes. Para ello, se emplearon metodologías que incluyen análisis geotécnicos, caracterización fisicoquímica de los jales y modelado de dispersión de contaminantes. Los resultados obtenidos permitirán proponer medidas de mitigación y gestión ambiental adecuadas para minimizar los riesgos identificados.

Palabras clave: presas de jales, impacto ambiental, caracterización fisicoquímica de jales, modelado de dispersión de contaminantes, gestión ambiental.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y a la Universidad Autónoma de Chihuahua por los datos proporcionados y su apoyo en la realización del estudio presentado en este capítulo.

Introducción

Desde tiempos de la Colonia, la minería ha sido un pilar económico en México, especialmente en algunas entidades como Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Durango, Guanajuato, San Luis Potosí e Hidalgo. Sin embargo, es sabido que esta actividad deja una huella ambiental significativa debido a la generación de residuos conocidos como jales. Estos desechos, compuestos por materiales finos y metales pesados, se almacenan en estructuras denominadas presas de jales.

Una de las más prominentes presas de jales está ubicada en municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo. La presa llamada Dos Carlos representa un foco de atención en la región debido a su potencial impacto ambiental y riesgos asociados con su estabilidad estructural.

A continuación se describe un estudio que evaluó detalladamente la estabilidad estructural de esa presa y su impacto ambiental en las zonas circundantes. Para ello, se emplearon metodologías que incluyeron análisis geotécnicos, caracterización físicoquímica de los jales y modelado de dispersión de contaminantes. Con los resultados es posible proponer medidas de mitigación y gestión ambiental adecuadas para minimizar los riesgos identificados.

Objeto de estudio

La presa Dos Carlos se localiza en las coordenadas 20°07'30" latitud norte y 98°44'00" longitud oeste, en el municipio de Mineral de la Reforma, dentro de la zona metropolitana de Pachuca, Hidalgo. Esta presa abarca aproximadamente 23 hectáreas y contiene alrededor de 14.3 millones de toneladas de residuos mineros (Rodríguez et al., 2021).

El método de beneficio empleado en este distrito minero para la extracción del oro y la plata fue por amalgamación con mercurio y cianuración. Los jales almacenados en esta presa son subproductos de procesos de beneficio de minerales, principalmente plata, plomo y zinc, y están compuestos por una mezcla de materiales finos y metales pesados.

Aunque gran parte de la población cercana al edificio de jales no percibe el problema ambiental, la proximidad de la presa a áreas urbanas y agrícolas incrementa la preocupación por posibles impactos, como la contaminación de suelos, cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como la dispersión

de partículas tóxicas a través del aire. Las condiciones meteorológicas del entorno, caracterizadas por ráfagas de viento que alcanzan velocidades de hasta 65 kph o más—registradas al menos nueve veces al año—, favorecen la propagación de partículas finas presentes en la superficie de los jales (COREMI, 1992; Romero et al., 2007). Además, la estabilidad estructural de la presa es crucial para prevenir deslizamientos o colapsos que podrían tener consecuencias catastróficas para las comunidades aledañas.

Justificación

La evaluación de la presa Dos Carlos es esencial por las siguientes razones:

- **Composición de los jales.** Los residuos almacenados contienen minerales como pirita, limonita-goethita-hematita, esfalerita, galena y calcopirita, asociados con cuarzo, calcita y silicatos (Hernández-Acosta et al., 2009). Esta composición indica la presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como arsénico, plomo, cadmio y zinc, que pueden movilizarse hacia el medio ambiente bajo ciertas condiciones.
- **Riesgo de drenaje ácido de mina (DAM).** La oxidación de sulfuros metálicos presentes en los jales puede generar drenaje ácido, que libera metales pesados al entorno y contamina suelos y cuerpos de agua. Este proceso es especialmente preocupante en regiones con precipitaciones significativas, donde el agua de lluvia puede infiltrar y lixiviar los contaminantes (Romero et al., 2007).
- **Dispersión de contaminantes por el viento.** La erosión eólica puede transportar partículas finas contaminadas desde la superficie de los jales hacia áreas habitadas, lo que representa un riesgo para la salud humana si son inhaladas. Las partículas menores a 10 micrómetros pueden penetrar en el sistema respiratorio y causar daños físicos y toxicidad si se solubilizan (Gutiérrez-Ruiz et al., 2007).
- **Arrastre de lodos tóxicos por lluvias.** Durante eventos de precipitación intensa, los lodos superficiales pueden ser arrastrados hacia zonas agrícolas y urbanas lo que contaminaría suelos y cuerpos de agua superficiales. Este fenómeno puede afectar la calidad del agua utilizada para consumo humano y actividades agrícolas, además de alterar los ecosistemas acuáticos locales.

- **Proximidad a zonas pobladas:** La expansión urbana ha acercado comunidades a las inmediaciones de la presa, aumentando la exposición potencial a contaminantes y riesgos asociados con posibles fallas estructurales de la presa.

Metodología

El estudio de la presa se llevó a cabo mediante una combinación de técnicas de análisis geotécnico, modelado hidrológico y evaluación de dispersión de contaminantes. Para abordar los objetivos planteados, se implementaron las siguientes metodologías:

Caracterización fisicoquímica de los jales:

- **Muestreo.** Se definieron nueve sitios dentro del área que abarca el edificio de jales. En las muestras compuestas recolectadas, se determinaron las características físicas y químicas, así como el contenido de elementos potencialmente tóxicos.
- **Análisis químico.** Se determinaron las concentraciones de metales pesados como arsénico, plomo, cadmio y zinc mediante espectrometría de absorción atómica.
- **Determinación de pH y potencial redox (ORP).** Se evaluaron las condiciones ácido-base y el potencial de oxidación-reducción para inferir la estabilidad química de los jales.

Análisis geotécnico:

- **Ensayos de laboratorio.** Se realizaron pruebas de corte directo y triaxiales para determinar parámetros de resistencia al cizallamiento y cohesión del material.
- **Modelado numérico.** Se emplearon softwares especializados para simular condiciones de carga estática y dinámica para evaluar factores de seguridad y posibles modos de falla.

Evaluación de la dispersión de contaminantes:

- **Modelado de erosión eólica.** Se utilizó el modelo CALPUFF para simular la dispersión de partículas en suspensión y estimar su alcance y concentración en áreas circundantes (Scire et al., 2000).
- **Análisis de escurrimientos superficiales.** Se aplicó el modelo SWAT para identificar áreas susceptibles al arrastre de lodos durante eventos de lluvia intensa (Arnold et al., 1998).

Monitoreo ambiental:

- **Calidad del aire.** Se instalaron estaciones de monitoreo para medir la concentración de partículas suspendidas en el aire en zonas aledañas.
- **Calidad del agua.** Se analizaron muestras de agua de pozos y cuerpos superficiales cercanos para detectar la presencia de metales pesados y evaluar posibles contaminaciones.

Resultados

Composición química de los jales. De acuerdo con los datos analizados, los residuos mineros presentaron textura franco-arenosa, bajo contenido de materia orgánica. El Zn (45 mg·kg⁻¹) y el Pb (14 mg·kg⁻¹) fueron los elementos con mayor concentración. El contenido de materia orgánica es muy bajo. El pH promedio fue de neutro a medianamente alcalino, lo que reduce el potencial de generación de drenaje ácido; sin embargo, no se descarta la posible lixiviación de los elementos tóxicos hacia cuerpos de agua subterráneos.

Estabilidad estructural. La densidad aparente que presenta el jal en estudio se corresponde con los suelos arenosos. Los ensayos de corte directo mostraron valores bajos de cohesión en algunas secciones de la presa o edificio de jales, lo que podría incrementar el riesgo de deslizamientos en caso de lluvias intensas o sismos. El modelado numérico reveló que, bajo condiciones sísmicas, el factor de seguridad de la presa se reduce significativamente en ciertos sectores, lo que requiere la implementación de refuerzos estructurales.

Impacto ambiental. El modelo CALPUFF indicó que el polvo generado por la erosión de los jales puede ser transportado hasta 5 km, lo que afecta la calidad del aire en comunidades cercanas y representa un riesgo para la salud respiratoria de los habitantes. Se encontraron rastros de metales pesados en pozos cercanos, sugiriendo una posible filtración de contaminantes desde la presa hacia el agua subterránea. Se identificaron zonas de acumulación de lodos tóxicos arrastrados por escurrimientos superficiales durante lluvias intensas, lo que puede impactar en el entorno.

Conclusiones

La evaluación de la presa de jales Dos Carlos confirma la presencia de riesgos estructurales y ambientales significativos. Con base en los resultados obtenidos, se proponen las siguientes estrategias de mitigación.

Estrategias de revegetación. Se recomienda la implementación de técnicas de fitoestabilización mediante el uso de especies vegetales tolerantes a metales pesados, como *Vetiveria zizanioides*, *Panicum virgatum* y *Salix spp.*, que pueden reducir la movilidad de los contaminantes en el suelo. La revegetación debe incluir la aplicación de enmiendas orgánicas y acondicionadores del suelo, como biocarbón y compost, para mejorar la retención de agua y la absorción de metales pesados.

Además se sugiere el establecimiento de barreras vegetales en los perímetros expuestos a la erosión cólica y la creación de coberturas vegetales en taludes con pendiente pronunciada para evitar la dispersión de polvo contaminado.

Mejora de los sistemas de drenaje. Se deben implementar sistemas de canales revestidos con geomembranas impermeables para reducir la infiltración de agua en los jales y minimizar la lixiviación de metales pesados hacia cuerpos de agua subterráneos.

También se recomienda diseñar un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la presa, para promover la retención y neutralización de metales pesados mediante la acción de microorganismos y plantas adaptadas.

Tratamientos de estabilización de taludes. Estos tratamientos consisten en la aplicación de tecnologías de consolidación con geopolímeros, los cuales pueden aumentar la cohesión del material y reducir la dispersión de partículas contaminadas; la implementación de muros de contención de suelo reforzado, que proporcionen estabilidad estructural adicional en áreas críticas identificadas mediante modelado numérico, así como el uso de técnicas de encapsulación con coberturas de arcilla y geomembranas, para evitar la exposición de los jales a la intemperie y disminuir su interacción con el agua de lluvia.

Monitoreo continuo y control de la contaminación. Se plantea la instalación de estaciones de monitoreo automático que midan en tiempo real la concentración de partículas en el aire y los niveles de contaminación del agua subterránea y superficial.

Se recomienda el uso de sensores piezométricos para evaluar cambios en la presión de poros y la estabilidad estructural de los taludes. Se establecerán protocolos de análisis periódicos, con muestreo semestral de suelos, agua y aire en la zona de influencia de la presa.

Implementación de barreras físicas y contención del polvo. Se requiere la construcción de barreras cortaviento, que reduzcan la dispersión de partículas finas y mejoren la calidad del aire en las comunidades cercanas, así como la instalación de rociadores de supresión de polvo en zonas de mayor actividad eólica con el empleo de soluciones de polímeros biodegradables para estabilizar la superficie de los jales. Además se recomienda el uso de coberturas sintéticas y geotextiles, que minimicen la erosión eólica y reduzcan el transporte de contaminantes a largas distancias.

Las estrategias aquí propuestas buscan minimizar los impactos ambientales negativos y mejorar la estabilidad estructural de la presa Dos Carlos. La implementación de estas medidas contribuirá significativamente a la prevención de desastres ambientales y la reducción de riesgos para la población cercana.

Referencias

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., y Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Consejo de Recursos Minerales (Coremi). (1992). *Monografía geológicominera del estado de Hidalgo*. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, 95 pp.
- Gutiérrez-Ruiz, M. E., Carrillo-Chávez, A., Ortiz, M., & Montero, J. (2007). Heavy metal pollution in soils and sediments in an abandoned mining district: Real del Monte, Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 29(4), 237-248.
- Hernández-Acosta, J. L., Flores, R. M., y Domínguez, A. C. (2009). Caracterización mineralógica de jales en el estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 45-60.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., y Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*, 703, USDA.
- Romero, F. M., Rubio, M. R., y Ruiz, J. L. (2007). Acid mine drainage in abandoned mining areas of Spain. *Science of the Total Environment*, 399(1-3), 191-200.
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., y Yamartino, R. J. (2000). A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. Earth Tech, Inc.

9 Normatividad en materia de seguridad de presas

Felipe Ignacio Arreguín Cortés
Instituto de Ingeniería. UNAM

Juan Francisco Humberto Marengo Mogollón
Comisión Nacional del Agua

Las presas de almacenamiento y derivación son fundamentales para la gestión del agua porque abastecen a diversos sectores (doméstico, industrial, agrícola, recreativo y energético), además, de que cumplen un rol crucial en la protección de las poblaciones contra inundaciones y como fuentes de abastecimiento en épocas de sequías.

En el mundo existen una serie de guías, normas, estatutos y leyes de muy variada naturaleza relacionadas con la seguridad de las presas de almacenamiento y derivación. La mayoría de ellas tienen un denominador común: consideran el análisis, la evaluación y la gestión del riesgo.

Toda normatividad en materia de seguridad de presas debe estar basada en dos principios: la salvaguarda de la vida de las personas, sus bie-

nes y el medio ambiente aguas abajo y en las proximidades de las obras, y la de las estructuras que componen la presa. Cada país o institución clasifica el peligro potencial de las presas con criterios diferentes considerando sus dimensiones, función o diseño. México cuenta con la Norma Mexicana NMX-AA 175-SCFI-2015 Operación segura de presas. El impacto del cambio global requieren medidas de adaptación en la seguridad de las presas, a nivel nacional e internacional.

En este capítulo se presenta un análisis de esta normatividad y se emiten propuestas normativas, de inclusión tecnológica y de trabajo conjunto con académicos, centros de investigación e instituciones gubernamentales.

Palabras clave: presas de almacenamiento y derivación, normatividad, seguridad, riesgo.

Introducción

Las presas de almacenamiento y derivación son obras estratégicas para el desarrollo económico y social de los países. Estas estructuras son fundamentales para la gestión del agua, ya que abastecen a diversos sectores: doméstico, industrial, agrícola, recreativo y energético; además, cumplen un rol crucial en la protección de las poblaciones contra inundaciones y como fuentes de abastecimiento en épocas de sequías.

De acuerdo con el sexto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), *The Physical Science Basis Climate Change, 2021*, el calentamiento global intensificará fenómenos extremos como inundaciones y sequías, lo que subraya la importancia de las presas para mitigar estos riesgos. Sin embargo, la complejidad técnica y los riesgos potenciales asociados con la operación y posible falla de las presas, hacen necesario contar con una normatividad moderna y fundamentada técnicamente, que garantice su seguridad estructural y funcional.

Según la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 2025), en el mundo existen más de 60 mil grandes presas. En México, hay aproximadamente 800 obras de este tipo y un total de 5600 registradas de todas las alturas, lo que evidencia la importancia de mantener estos sistemas en condiciones de seguridad.

El impacto del cambio global (que incluye el cambio climático y el cambio del uso del suelo) es uno de los factores que pone en riesgo estas infraestructuras e incrementa la importancia de contar con normativas que aseguren su operación segura y sostenible.

Normatividad para la seguridad de presas

La normatividad en esta materia abarca un conjunto de regulaciones, estándares y procedimientos para que las presas sean diseñadas, construidas, operadas y mantenidas de manera segura y eficiente, con el objetivo de salvaguardar vidas humanas, el medio ambiente y los bienes materiales ubicados aguas abajo.

A nivel internacional la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés), ha establecido directrices técnicas que sirven como referencia para la seguridad estructural y funcional de estas obras

y cada país las ha adaptado a sus condiciones geográficas, climáticas, socioeconómicas y políticas.

Hay ejemplos de países con normativas robustas sobre la seguridad de presas. Brasil, por ejemplo, ha implementado su Ley de Seguridad de Presas, que asigna responsabilidades claras a los propietarios y operadores, y crea un marco regulatorio para la supervisión de estas. En Estados Unidos, cada estado establece sus propias regulaciones al definir criterios de diseño, operación y mantenimiento, así como protocolos para la respuesta ante emergencias.

Este tipo de normativa ha sido reconocida por instituciones como el Banco Mundial, que ha propuesto lineamientos esenciales, deseables y emergentes para la regulación de presas a nivel global.

- **Esenciales.** Se enfocan en garantizar que los propietarios y operadores de las presas sean responsables de su mantenimiento, operación y seguridad. También establecen la necesidad de reguladores que supervisen el cumplimiento de la normativa para proteger a las comunidades y el medio ambiente.
- **Deseables.** Se propone la creación de una autoridad reguladora dedicada exclusivamente a la seguridad de las presas, con capacidad para realizar inspecciones periódicas y coordinar acciones en presas de alto riesgo.
- **Emergentes.** Dado que la seguridad de las presas es un concepto dinámico, se considera necesario actualizar las normativas a medida que cambia el conocimiento científico, el contexto social y económico, así como los efectos del cambio climático.

Normativa de seguridad de presas en México, la NOM-012-SCFI-1999

En México, la seguridad de las presas está regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1999 denominada “Requisitos de seguridad de las presas de almacenamiento”. Esta norma se encarga de establecer los lineamientos y requerimientos mínimos para garantizar la seguridad estructural y funcional de las presas e incluye los siguientes puntos clave:

- **Diseño y construcción.** Establece las condiciones que deben cumplirse desde el diseño inicial de la presa, tomando en cuenta factores geotécnicos, hidráulicos y sísmicos. Además, la norma requiere la elaboración de

estudios de viabilidad que consideren los riesgos naturales y antrópicos de la zona donde se ubicará la obra.

- **Operación y mantenimiento.** Define las obligaciones de los operadores, concesionarios y propietarios de las presas en cuanto a la vigilancia y mantenimiento preventivo y correctivo. Los procedimientos de operación deben ser consistentes con los manuales técnicos aprobados y deben prever medidas para situaciones de emergencia.
- **Inspecciones periódicas.** Requiere que se lleven a cabo inspecciones periódicas para evaluar el estado de conservación y funcionamiento de la presa, con el fin de prevenir fallas. Estas inspecciones incluyen tanto las estructuras de almacenamiento como las compuertas, vertedores y sistemas de control de caudal.
- **Planes de acción ante emergencias.** Obliga a contar con planes de emergencia actualizados y coordinados con las autoridades locales y nacionales. Estos planes deben especificar las acciones a seguir en caso de un evento extraordinario (lluvias intensas, sismos o fallas estructurales) y deben garantizar la protección de las comunidades aguas abajo.

Impacto del cambio global y medidas de adaptación en la seguridad de presas

El cambio global es un desafío que afecta directamente la seguridad y operación de las presas. En este contexto, estas estructuras pueden ser afectadas por fenómenos como precipitaciones extremas, sequías prolongadas o fluctuaciones en la temperatura. Estos factores pueden influir en la estabilidad de las cortinas, el funcionamiento de los vertedores y la calidad del agua almacenada, entre otros aspectos.

Ejemplos recientes en presas mexicanas, como el aumento de avenidas en la presa de El Infiernillo durante eventos de lluvias intensas, ilustran la necesidad de medidas de adaptación. Las proyecciones futuras apuntan a que el cambio climático provocará un incremento en la variabilidad hidrológica, lo que requerirá ajustar los diseños de nuevas presas y actualizar las existentes, además de adaptar la normatividad, incorporar nuevas herramientas tecnológicas como la IA, así como de la colaboración de la academia e instituciones gubernamentales.

Propuestas normativas. A nivel internacional, guías como las de Atkins (2013) y estudios como los de González y Arreguín (2021), sugieren que las normativas deben incluir medidas de adaptación estructural y funcional para las presas. Algunas de las acciones propuestas incluyen la elevación de crestas, mejora de compuertas y vertedores, así como políticas de operación más flexibles ante cambios en los patrones de precipitación.

En México es esencial la actualización de la NOM-012-SCFI-1999 para incluir criterios que aborden los efectos del cambio climático. Las medidas podrían incluir la regulación de la operación de presas con niveles de aguas máximas ordinarias más bajos antes de las temporadas de lluvias intensas, y la instalación de sistemas de alerta temprana para la gestión de inundaciones en tiempo real.

Tecnología e inteligencia artificial en la seguridad de presas. El empleo de sensores, drones, modelos digitales o basados en IA permiten monitorear en tiempo real la estabilidad estructural y operativa. Tecnologías como *Big data* o el aprendizaje automático ayudan a optimizar la gestión y mejorar los sistemas de alerta temprana.

Papel de la academia, centros de investigación y el Comité mexicano de la ICOLD. Las universidades y los centros de investigación deben jugar un papel fundamental en el modelado hidrológico y la evaluación estructural de las presas. El Comité Mexicano de Grandes Presas (perteneciente al ICOLD), es sin duda un elemento de apoyo por su capacidad para promover la cooperación internacional, la recopilación de datos y colaborar en la actualización de las normas mexicanas.

Conclusiones

La gestión adecuada de las presas de almacenamiento y derivación es vital para garantizar la seguridad hídrica y mitigar los impactos de fenómenos extremos. México cuenta con una normativa sólida (NOM-012-SCFI-1999), pero es fundamental adaptarla para enfrentar los desafíos del cambio global. Las actualizaciones deberán contemplar los aspectos estructurales y los funcionales con un enfoque en la resiliencia hídrica, la seguridad de las infraestructuras y la protección de las comunidades aguas abajo.

Contar con el Comité mexicano del ICOLD es fundamental para que, junto con autoridades, academia y centros de investigación trabajen en la actualización de la normativa mexicana en materia de seguridad de presas.

Para garantizar la seguridad en el futuro, México debe adoptar un enfoque proactivo que incluya:

- **Actualización de la NOM-012-SCFI-1999.** Adaptarla a los nuevos desafíos que plantea el cambio climático y los eventos extremos para asegurar que las presas cuenten con diseños más flexibles y capaces de soportar variaciones hidrológicas más extremas.
- **Fortalecimiento de la infraestructura existente.** Implementar programas nacionales de rehabilitación y modernización de las presas existentes para mejorar la capacidad para resistir fenómenos naturales extremos como lluvias torrenciales, sismos o sequías prolongadas.
- **Sistemas de monitoreo avanzados.** Incorporar tecnologías de monitoreo en tiempo real para predecir y gestionar riesgos lo que permite la toma de decisiones más informada y oportuna ante posibles fallas o situaciones críticas.
- **Capacitación y educación.** Fomentar la capacitación continua de operadores y técnicos responsables, así como la concientización de las comunidades cercanas para actuar rápidamente ante emergencias.

Con medidas como las anteriores, México podrá garantizar la seguridad de sus presas y la sostenibilidad de los recursos hídricos en el contexto del cambio climático y el crecimiento poblacional.

Referencias

- Atkins. (2013). Impact of Climate Change on Dams & Reservoirs. Final Guidance Report. Government of UK, Department of Environment, Food and Rural Affairs.
- González V. F. y Arreguín C. F. (2021). *Impacto del Cambio Global sobre las presas de almacenamiento y derivación. Una guía para fortalecer la normatividad de seguridad de presas.* Instituto de Ingeniería. UNAM.
- International Commission on Large Dams. (2025). *World Register of Dams/Registre Mondial des Barrages.*
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. (2021). *The Physical Science Basis Climate Change.* <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Rubinato, M., Luo, M., Zheng, X., Pu, J.H., y Shao, S. (2020). Advances in Modelling and Prediction on the Impact of Human Activities and Extreme Events on Environments. *Water*, 12(6), 1768.

10 Revisión sistemática de los datos de funcionamiento de vaso de grandes presas hidroeléctricas de México

Maritza Liliana Arganis Juárez
Alejandro Mendoza Reséndiz
Ramón Domínguez Mora
Instituto de Ingeniería, UNAM

El manejo de las principales presas generadoras de energía eléctrica de México es fundamental para garantizar la demanda de la población así como el control y regulación de avenidas. Uno de los organismos operadores de estos embalses a nivel federal identificó la necesidad de realizar una revisión detallada de sus registros y cálculos de funcionamiento de vaso de embalses prioritarios.

En este capítulo se presentan los resultados de un estudio realizado para efectuar la identificación y revisión de los datos con sospecha de tener errores inherentes (de captura o retrasmisión) o atribuidos a cambios en las curvas batimétricas de los embalses. La revisión se apoyó en el

uso de programas desarrollados en Python para la realización de las gráficas que describen el comportamiento de las variables analizadas.

Se presenta el caso de la presa La Yesca en el río Santiago para el que se detectaron y corrigieron la mayoría de los datos de elevaciones o de almacenamientos con los que se pudieron obtener valores lógicos de las curvas elevaciones-capacidades, elevaciones-tiempo, almacenamiento-tiempo, ingresos-tiempo. Los archivos de datos modificados servirán para alimentar una base de datos confiable que podrá ser ocupada y actualizada en los años siguientes por el organismo operador.

Palabras clave: río Santiago, presa La Yesca, curva elevaciones-capacidades, manejo de presas generadoras de energía eléctrica, revisión de cálculos de funcionamiento de embalses.

Antecedentes y recopilación de datos

El manejo de las principales presas generadoras de energía eléctrica de México no sólo es fundamental para garantizar la demanda de la población sino también en el control y regulación de avenidas. Uno de los organismos operadores de estos embalses a nivel federal identificó la necesidad de realizar una revisión detallada de sus registros y cálculos de funcionamiento de vaso de embalses prioritarios, ya que un país, por parte de las dependencias de gobierno, para el manejo y operación de los principales embalses requiere de una agrupación adecuada de los datos medidos y estimados con ayuda de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica.

En México se cuenta con distintas bases de datos de libre consulta, de hidrometría y de la operación de presas en los sitios oficiales de dependencias federales tales como el Banco Nacional de Aguas Superficiales, Bandas y el Sistema de Información Hidrológica, SIH de la Comisión Nacional del Agua. En el caso de los organismos encargados de operar a las presas hidroeléctricas de mayor importancia a nivel nacional, sus bases de datos no están abiertas al público. No obstante dichas dependencias requieren contar con información histórica verídica y confiable para realizar sus procesos de simulación que ayuden a tomar decisiones en el tema de generación de electricidad, así como de extracciones que deban realizar en el caso de presas que tienen también como propósito adicional la regulación y el control de inundaciones.

En este capítulo se presenta el procedimiento realizado en un estudio para efectuar la identificación y revisión de los datos con sospecha de tener errores inherentes (de captura o retrasmisión) o atribuidos a cambios en las curvas batimétricas de los embalses, por mencionar algunas causas. La revisión se apoyó en el uso de programas desarrollados en Python para la realización de las gráficas que describen el comportamiento de las variables analizadas.

Se presenta el caso de la presa La Yesca en el río Santiago para el que se detectaron y corrigieron la mayoría de los datos de elevaciones o de almacenamientos con los que se pudieron obtener valores lógicos de las curvas elevaciones-capacidades, elevaciones-tiempo, almacenamiento-tiempo, ingresos-tiempo. Los archivos de datos modificados servirán para alimentar una base de datos confiable que podrá ser ocupada y actualizada en los años siguientes por el organismo operador.

Metodología para la revisión y corrección de datos

El organismo operador cuenta con archivos digitales del funcionamiento diario de los vasos que administra (Fig. 10 1).

16	6	sábado	527.00	167.73	19.62	5.60	0.00	5.60	0.10	2.49	0.06	2.55	2.85	2,202.38	7.57	29.52
17	7	domingo	526.84	164.58	19.58	6.99	0.00	6.99	0.10	3.41	3.68	7.09	2.85	2,176.79	7.57	82.10
18	8	lunes	526.84	164.58	19.58	0.00	0.00	0.00	0.10	3.72	-1.45	2.27	2.85	0.00	7.57	26.32
19	9	martes	526.95	166.75	19.61	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	3.26	3.26	2.85	0.00	7.57	37.74
20	10	miércoles	527.11	169.90	19.64	5.06	0.00	5.06	0.10	0.00	1.01	1.01	2.84	1,761.75	6.98	11.73
21	11	jueves	526.90	165.76	19.59	4.86	0.00	4.86	0.07	0.00	4.74	4.74	2.85	1,691.12	5.42	54.81
22	12	viernes	526.89	165.56	19.59	5.36	0.00	5.36	0.10	1.79	2.09	3.88	2.85	1,625.16	7.29	44.95
23	13	sábado	526.81	163.98	19.57	3.93	0.00	3.93	0.09	5.84	0.74	6.58	2.85	1,366.01	6.86	76.20
24	14	domingo	526.94	166.55	19.60	4.55	0.00	4.55	0.10	5.91	-1.26	4.65	2.85	1,270.84	7.15	53.80
25	15	lunes	526.94	166.55	19.60	0.00	0.00	0.00	0.10	7.10	6.22	13.32	2.85	0.00	7.15	154.13
26	16	martes	527.61	179.77	19.75	0.00	0.00	0.00	0.10	7.33	1.84	9.17	2.83	0.00	7.15	106.18
27	17	miércoles	528.07	188.94	19.86	2.88	0.00	2.88	0.10	8.62	0.68	9.29	2.83	1,143.66	7.02	107.58
28	18	jueves	528.39	195.16	19.93	3.98	0.00	3.98	0.09	6.44	0.39	6.84	2.82	1,772.59	6.47	79.12
29	19	viernes	528.53	197.92	19.96	4.41	0.00	4.41	0.07	4.32	2.33	6.65	2.82	1,283.01	5.06	76.97
30	20	sábado	528.64	200.09	19.99	5.22	0.00	5.22	0.07	4.38	0.32	4.69	2.81	1,608.09	4.80	54.32
31	21	domingo	528.61	199.50	19.98	4.45	0.00	4.45	0.06	5.64	0.65	6.29	2.81	1,570.03	4.34	72.80
32	22	lunes	528.70	201.27	20.00	0.37	0.00	0.37	0.06	4.34	0.24	4.58	2.81	133.21	4.34	52.96
33	23	martes	528.91	205.41	20.05	0.00	0.00	0.00	0.06	4.24	1.35	5.58	2.81	0.00	4.34	64.64
34	24	miércoles	529.19	210.94	20.11	3.90	0.00	3.90	0.08	4.24	1.91	6.16	2.80	1,381.59	5.86	71.24
35	25	jueves	530.30	213.11	20.13	2.62	0.00	2.62	0.05	7.14	2.64	10.08	2.80	1,350.00	2.92	116.68

Fig. 10.1. Tabla de datos originales de organismo operador. Presa La Yesca, Jal.-Nay.

En particular la presa La Yesca se identifica por ser la segunda presa del sistema en cascada alojada sobre el río Santiago, que corre en las entidades de Nayarit y Jalisco. Los datos aparecen en la hoja 2 del archivo de datos originales.

Conforme fue aumentando el sistema de presas, los conceptos que se contemplan en estos documentos han cambiado, pero de los años recientes la información principal de la presa La Yesca está agrupada por columnas como se indica a continuación:

Columna	Dato
A	Número de día
B	Nombre del día
C	Elevación del vaso a las 6 horas del día, msnm
D	Volumen útil, hm ³ o 10 ⁶ m ³
E	Área del embalse, km ²

Enseguida aparece la sección Extracciones y salidas:

Columna	Dato
F	Turbinas, hm^3 o 10^6m^3
G	Vertedor, hm^3 o 10^6m^3
H	Total, hm^3 o 10^6m^3
I	Evaporación, hm^3 o 10^6m^3

Posteriormente aparecen ingresos de presas aguas arriba y aportaciones:

Columna	Dato
J	Extracción Santa Rosa, no indican unidades, se supone en hm^3 o 10^6m^3
K	Cuenca propia, hm^3 o 10^6m^3
L	Total, hm^3 o 10^6m^3

Enseguida aparecen datos de la hidroeléctrica relacionados con la generación:

Columna	Dato
M	Consumo específico (m^3/KWh)
N	Generación bruta, MWh
O	Evaporación, mm

Finalmente dan el gasto medio diario de ingreso por cuenca propia:

Columna	Dato
P	Gasto medio diario c.p., m^3/s

Para realizar la corrección de los datos se realiza lo siguiente:

1. Visualización de datos. Se dibujan gráficos con Python, donde el eje horizontal representa el tiempo y los valores de las aportaciones (tanto por cuenca propia como totales) en hm^3 , así como la curva de elevaciones.

2. Identificación de puntos sospechosos. Se identifican valores positivos y negativos en los datos de las aportaciones totales (subidas y bajadas bruscas) que podrían contener errores. Se seleccionan aproximadamente 10 valores para revisión. Se dibujan porciones de la curva elevaciones-volúmenes para revisar posibles cambios en la batimetría

3. Corrección de puntos sospechosos. Se recalculan los datos que no fueron alimentados de manera fija por el organismo operador. Se utilizan columnas resaltadas, varias de las cuales se añaden al archivo de datos originales.

4. Extensión de la información histórica o rellenado, en caso de ser aplicable.

Resultados y discusión

La gráfica con los valores de las aportaciones, tanto por cuenca propia como totales, en hm^3 , así como la evolución de las elevaciones se observan en la figura 10.2. De los datos de las aportaciones totales se identificaron los valores positivos y negativos (subidas y bajadas bruscas, con sospecha de contar con errores), se tomaron cerca de diez valores en total a revisar. También se dibujaron porciones de la curva elevaciones-volúmenes para revisar fechas de posibles cambios en la batimetría.

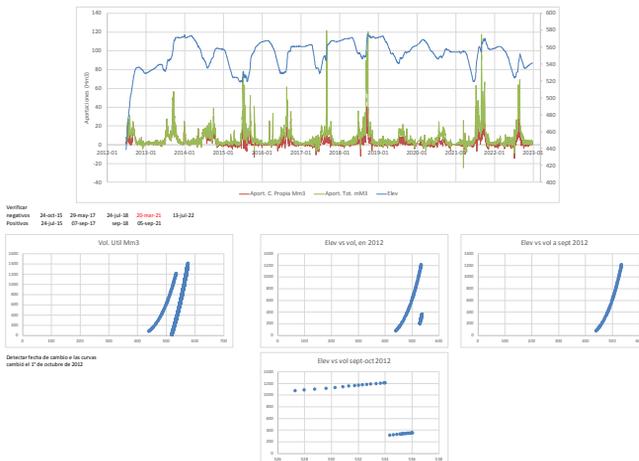


Fig. 10.2. Figuras construidas para la revisión de datos de la presa La Yesca, Jal.-Nay.

Para hacer la propuesta de corrección de los datos se recalcularon los datos que no fueron alimentados de manera fija por el organismo operador. En este caso los correspondientes a las columnas de la hoja prop cambios datos con curvas, resaltadas en la figura 10.3, varias de ellas añadidas al archivo de datos originales, se describen a continuación.

- El volumen útil calculado con una macro para interpolar de la hoja añadida Capacidad útil que contiene la curva elevaciones-capacidades útiles, en hm^3 . Se detectó que en el archivo de datos originales se tenía reportado el volumen total y no el volumen útil.
- J Extracción turbinas, m^3/s determinada con los datos de la columna L dividiendo el volumen entre el tiempo de un día expresado en segundos y transformando a m^3 los hm^3 .
- K Área, km^2 , obtenida con interpolación, de la curva elevaciones-áreas reportada en la hoja Área.
- N Vertedor, hm^3 , calculada transformando las salidas del vertedor, en m^3/s , de la columna M multiplicando por el tiempo en segundos y convirtiendo a hm^3 .
- O Extracción total en m^3/s , estimada con los datos de la columna O dividiendo el volumen entre el tiempo de un día expresado en s y transformando a m^3 los hm^3 .
- P Extracción total, hm^3 obtenida con la suma del volumen vertedor de la columna N más la columna del volumen de turbinas de la columna L, ambos en hm^3 .
- Q Evaporación volumen, hm^3 se calculó con el área en km^2 , de la columna K multiplicada por la evaporación de la columna W, en mm, dividida entre 1000 y reducida por el factor del evaporímetro de 0.7, para obtener hm^3 .
- S Aportación cuenca propia, hm^3 , se obtuvo restando la aportación total de la columna T menos la extracción Santa Rosa de la columna R.
- T Aportación total en hm^3 ; aproximada con la ecuación de principio de conservación del volumen como almacenamiento final menos almacenamiento inicial (de la columna I renglón $i + 1$ menos renglón i) más Extracción total de la columna P más la evaporación en volumen de la columna Q.

- Y Gasto medio diario (por cuenta propia) en m³/s, se calculó dividiendo la aportación por cuenta propia de la columna S entre los segundos de un día y convirtiéndolo a m³ los hm³.
- Las columnas de A a E se insertaron para hacer el dibujo de puntos de la curva elevaciones-capacidades antes y después e incluyendo al punto sospechoso; en el caso de detectar ascensos o descensos bruscos en la curva elevaciones-capacidades; se indica la causa probable del error cometido (Fig. 10.4).

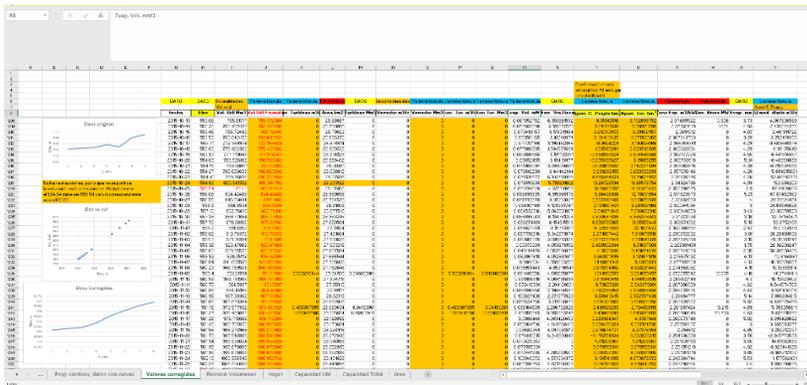


Fig. 10.3. Conceptos puestos con ecuación e identificación de puntos sospechoso con los datos de la curva elevaciones-capacidades.

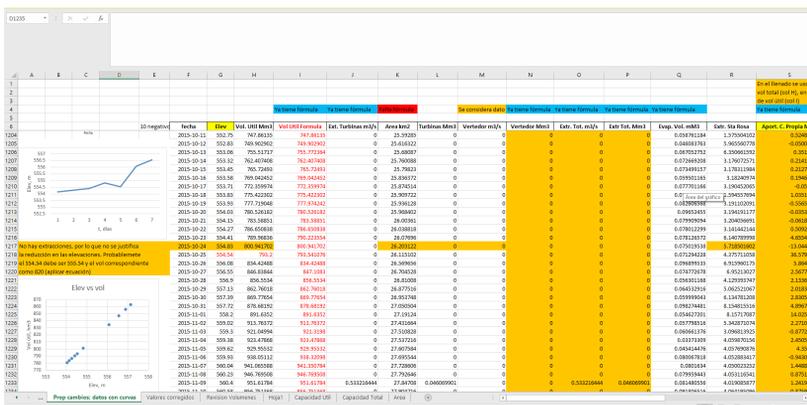
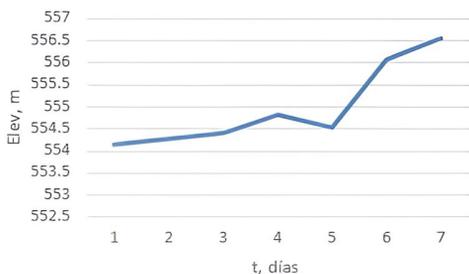


Fig. 10.4. Ejemplo de punto sospechoso, anotación de causa de dato erróneo y propuesta de corrección.



La hoja con los datos corregidos se añade en el libro Excel (Fig. 10.5) y se incluyen las gráficas con los datos corregidos (Fig. 10.6).

No hay extracciones por lo que no se justifica la reducción de las elevaciones. Probablemente el 554.54 debe ser 555.54 y el volumen correspondiente como 820 (aplicar ecuación).

Fig. 10.5. Hoja de datos corregidos.

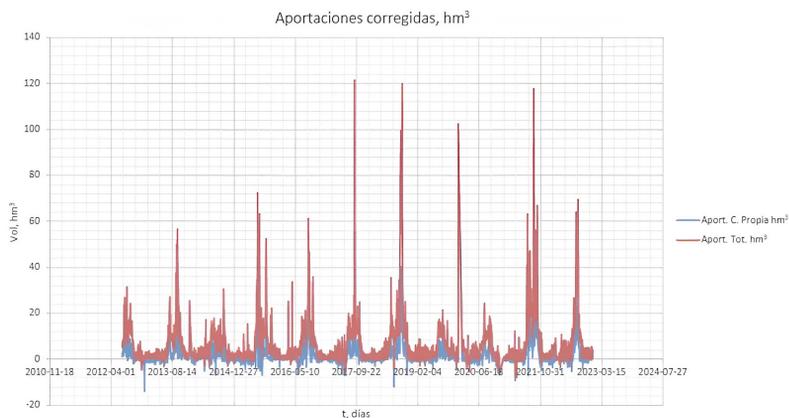


Fig. 10.6. Gráfica de aportaciones corregidas, hm^3 .

En el caso de la presa La Yesca, por sus años de construcción (2008-2012), se cuenta con datos del SIH CONAGUA, para añadir información en periodos en los que puedan faltar datos al organismo operador; pero para los anteriores a su construcción no se tiene información directamente de la base de datos Bandas, Conagua para extender el registro previamente a la construcción del embalse. Se tendría que revisar con hidrométricas si se quisiera tener un registro hipotético de cómo habría operado la presa en caso de haber existido antes de 2008.

Conclusiones

Con apoyo de programas de cómputo de uso libre, hojas de cálculo, macro de interpolación y gráficas, se propuso y aplicó un procedimiento sistemático para la rápida identificación y corrección de datos dudosos del funcionamiento de vaso de una de las principales presas hidroeléctricas de México. Este procedimiento ayuda a tener en poco tiempo la información que, llevada a un base de datos, y puede ser utilizada para los análisis que realice el organismo operador.

Referencias

- Comisión Federal de Electricidad. (2024). Datos de funcionamiento de vaso presa, La Yesca. Portal de transparencia.
- Comisión Nacional del Agua. (2024) Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- Comisión Nacional del Agua. (2024) Sistema de Información Hidrológica (SIH). <https://sih.conagua.gob.mx/>

11 Modelación unidimensional de un jardín de lluvia para analizar su comportamiento hidrológico hidráulico

Oscar Jesús Llaguno Guilberto, Raúl Medina Mendoza
Juan Manuel Figueroa Mendiola, José Manuel Rodríguez Varela
Jomaelah Morales Rayo
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Vanessa Ortiz Burciaga
Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua

Resumen

En el presente capítulo se muestran los alcances del trabajo realizado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en la modelación de jardines de lluvia mediante un modelo numérico hidrológico–hidráulico, que permitió dimensionar una captación de agua de lluvia. Con base en los resultados obtenidos, se construyó en las instalaciones del IMTA, el sistema que permite recibir los escurrimientos generados en el techo y en el estacionamiento del edificio denominado “Eventos extremos y cambio climático” con el fin de descargar el agua pluvial al jardín. Asimismo, se capturaron los escurrimientos de la calle contigua al jardín de lluvia mediante una boca de tormenta construida en la calle.

El jardín de lluvia consta de cuatro secciones divididas por tres vertederos, construidos con geocostales, para maximizar el volumen almacenado en el mismo con el fin de disminuir el pico del escurrimiento e infiltrar la mayor cantidad de agua de lluvia de la cuenca en estudio. Para el dimensionamiento del jardín de lluvia y el área de captación de esta se elaboró el modelo en la herramienta SWMM, que permite modelar los elementos LID (desarrollo de bajo impacto, por sus siglas en inglés). Con este modelo se pudieron simular los eventos de lluvia del 4 y 14 de agosto del 2023, ya que se cuenta con mediciones de campo y registro fotográfico, que permitió comparar los resultados simulados en SWMM contra los valores medidos, mismos que generaron una respuesta satisfactoria.

Palabras clave: LID, modelación 1d, SWMM, SBN, jardín de lluvia.

Introducción

A través de su historia, diversas ciudades mexicanas debido a su ubicación geográfica se han visto afectadas por fenómenos meteorológicos extremos como, por ejemplo, las precipitaciones extremas, producto de huracanes, tormentas y depresiones tropicales, así como fenómenos convectivos. Anteriormente, los tomadores de decisiones se inclinaban a dimensionar y construir infraestructura “gris”, como colectores pluviales y canales revestidos, con el objetivo de desalojar lo más rápido posible el agua de lluvia, obras que en muchos casos mitigan el problema de inundación. Sin embargo, en un entorno como el que vivimos, el cambio climático presiona a establecer una combinación de infraestructura gris y verde que no se limite solo a reducir el problema del agua en las calles en tiempo de lluvias.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), como parte de sus proyectos internos, realizó un trabajo durante cuatro años con el fin de mejorar el alcance del modelo hidrológico-hidráulico para el jardín de lluvia. Este trabajo se realizó con la herramienta SWMM, que permite modelar de manera unidimensional los elementos de desarrollo de bajo impacto (LID). Entre los objetivos se propuso establecer eventos de lluvia del 4 y 14 de agosto del 2023, con mediciones y registro fotográfico para establecer comparaciones con los datos del modelo numérico, con el fin de generar una respuesta satisfactoria entre lo medido en campo y lo obtenido numéricamente.

Metodología

En el año 2021 se llevó a cabo la propuesta de realizar, dentro de las instalaciones del IMTA, un sistema de captación/retención con un jardín de lluvia, con el objetivo de monitorear su funcionamiento y poder reproducir su comportamiento en un modelo hidráulico. La zona de estudio es de 500 m² y se propuso analizar tres subcuencas (Fig. 11.1), cuyas características se presentan en la Tabla 11.1.

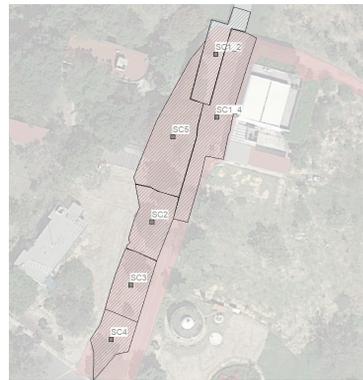


Fig. 11.1. Subcuencas ubicadas en el jardín de lluvia.

Tabla 11.1. Características generales de las cuencas.				
Nombre	Área (ha)	Ancho (m)	% impermeable	Pendiente (%)
SC1-2	0.0193	10.56	99	2
SC1-4	0.04	13.94	36.52	2.29
SC2	0.03	32.31	21.32	7.21
SC3	0.015	35.42	18.21	7.92
SC4	0.02	14.57	5.97	11.17
SC5	0.05	13.05	16.52	7.1

Para los parámetros de diseño de la infraestructura verde se tomaron en cuenta los datos del documento realizado por el IMTA (2021), donde se realizaron trabajos exploratorios de la zona de estudio por medio de la excavación de tres pozos a cielo abierto. Se propusieron tres vertedores elaborados con geomalla para retención del flujo. Estos geocostales se rellenaron de arena y se colocaron de manera transversal al flujo del agua (Fig. 11.2).



Fig. 11.2. Geocostales que conforman vertedores.

La construcción del sistema de captación de agua de lluvia en las instalaciones del IMTA, consistió en apoyarse en dos techos del estacionamiento del edificio de “Eventos extremos y cambio climático” que cubren un área de 193 m². Se instalaron canaletas de material galvanizado con sus respectivos soportes de hierro, conectadas a tres bajadas de tubería de PVC de 4 pulgadas para conducir el agua de lluvia, la cual llega a un registro; en este se conectan dos tuberías de 4 pulgadas de PVC (IMTA, 2023). Para llegar al jardín de lluvia, a partir del registro, se instalaron 15 metros de tubería de 6 pulgadas con reducción en la descarga a 4 pulgadas. Así mismo, para ayudar a enviar

más agua al jardín, se construyó una boca de tormenta con tubería de PVC para su descarga en este. Véanse las instalaciones en prototipo en las figuras 11.3 y 11.4.

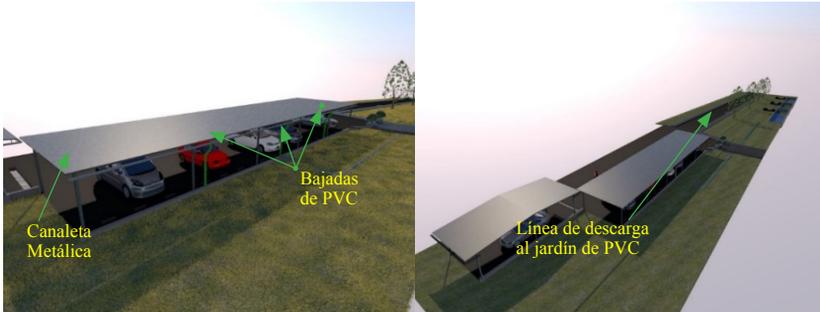


Fig. 11.3. Diseño y ubicación de las instalaciones hidráulicas en zona de estudio del jardín de lluvia.



a)

b)

c)

Fig. 11.4. a) Instalación de canaletas y bajadas; b) tubería de 4 pulgadas; c) boca de tormenta y tubería de descarga al jardín (IMTA, 2023).

Resultados y discusión

Las características de los geocostales, junto con tres vertedores, un pluviómetro, 16 nodos, 2 salidas, 16 tuberías, 3 LIDS y 6 subcuencas se integraron y se procesaron en el software SWMM (Fig. 11.5).

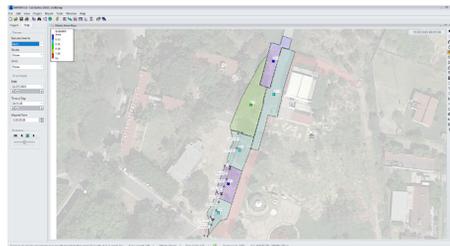


Fig. 11.5. Modelo LID para el jardín de lluvia del IMTA (IMTA, 2023).

Calibración del modelo. Para realizar la calibración del modelo y conocer qué tan alejados o acertados son los resultados del modelo numérico con respecto a la realidad, se dispone información de dos lluvias que tuvieron lugar el 4 y 14 de agosto del año 2023. El evento del 4 de agosto del 2023 comenzó a las 18 horas, según reportes de la EMA del IMTA, con registros de precipitación a cada 10 minutos, con una duración de 4 horas y una precipitación total de 8.81 mm (Tabla 11.2).

Tabla 11.2. Datos de lluvia a cada 10 minutos del evento del 4 de agosto de 2023.

Fecha y hora	Pp (mm)	Fecha y hora	Pp (mm)
04/08/2023 18:00	1.603	04/08/2023 19:50	0.1
04/08/2023 18:10	3.607	04/08/2023 20:00	0.1
04/08/2023 18:20	0.802	04/08/2023 20:10	0.301
04/08/2023 18:30	0	04/08/2023 20:20	0.1
04/08/2023 18:40	0.301	04/08/2023 20:30	0.2
04/08/2023 18:50	0.1	04/08/2023 20:40	0.1
04/08/2023 19:00	0.301	04/08/2023 20:50	0
04/08/2023 19:10	0.501	04/08/2023 21:00	0
04/08/2023 19:20	0.301	04/08/2023 21:10	0
04/08/2023 19:30	0.2	04/08/2023 21:20	0.1
04/08/2023 19:40	0.1	04/08/2023 21:30	0

Al analizar la información, se observó que en el primer vertedor (SC2) se percibe todavía algo de retención en la zona cercana al vertedor y la huella del agua llega casi a los 4 metros del vertedor hacia aguas arriba. Asimismo se estimó un tirante de 18 cm con respecto al fondo del vertedor. El modelo hidráulico presenta una altura de 21 cm en el vertedor ubicado en SC2, con una huella de agua estimada de 10 metros (véase Fig. 11.6).

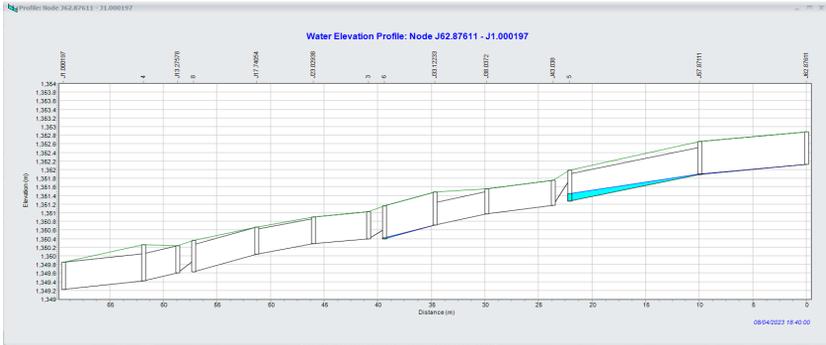


Fig. 11.6. Perfil de flujo en el jardín microcuenca LID.

Con respecto a las aportaciones de flujos al LID, se tiene un escurrimiento muy pequeño, con una lámina en la tubería menor a 2 cm, con los ingresos que se tienen por tuberías que provienen de la cuenca SC1-4. Asimismo, la cuenca SC1-2 se forma a partir de la captación de los techos y, el escurrimiento es captado por canaletas y conducido por tuberías al inicio de la cuenca SC2.

En modelo hidráulico, para la descarga proveniente de SC1-4 se tiene un gasto de 0.87 l/s, con un tirante de 2 cm, cuando se presentó la lámina mayor de lluvia en el evento. Con respecto a la subcuenca SC1-2, se registra un gasto de 0.33 l/s, en el tiempo pico. En la tabla 11.4 se muestran los resultados comparativos del prototipo-modelo numérico, según los aforos de los eventos del 4 y 14 de agosto del 2023, en cada sección con respecto al tirante.

Tabla 11.4 Diferencia entre lo medido en campo y el modelo numérico.				
Lluvia	Pp total (mm)	En campo	Modelo	Error relativo
		H. Vertedor SC2 (cm)	H. Vertedor SC2 (cm)	SC2 (%)
04/08/2023	8.81	18	21	9.52
14/08/2023	6.63	15	18	11.11

Conclusiones

El error relativo (ER) determinado contempla un nivel de confianza del 85%, lo que genera que los resultados obtenidos se encuentren dentro de una aceptación, por lo que el modelo hidráulico se puede considerar calibrado y se utilizará para continuar los escenarios para diferentes periodos de retorno.

Se puede notar la sensibilidad del primer vertedor ubicado en SC2 que genera la mayor retención de flujo en la cuenca y para avenidas con mayor precipitación. Se obtuvieron resultados relevantes para la investigación de estos sistemas.

Será importante continuar con el registro de la información de otras lluvias en próximos años y observar la respuesta del LID. Es importante señalar que por el momento no se tiene un sistema de monitoreo constante de parámetros dentro del LID (temperatura, precipitación, humedad relativa, evaporación) que, de acuerdo con el IMTA (2020), podría costar aproximadamente \$71 174.70 (pesos mexicanos) a la fecha.

Referencias

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2021). *Diseño de LID para mitigación de inundaciones. Informe final HC2108.1*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2022). *Proyecto "Implementación en campo de un sistema lid en el IMTA", Informe final HC2211.1*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2023). *Soluciones basadas en la naturaleza: humedales artificiales e infraestructura de bajo impacto (LID) para la depuración de agua y control de inundaciones, Informe final HC2312.1*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

12 Comparativo del rendimiento de los modelos lluvia-escurrimiento HBV y SAC-SMA en la cuenca del río Tepalcatepec

Ulises Absalom Barajas Madrigal

José Jaime Madrigal Barrera

Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Resumen

La determinación de la disponibilidad de los recursos hídricos es de vital importancia para su gestión y esto se logra mediante modelos matemáticos. Existe una amplia gama de estos llamados modelos lluvia-escurrimiento, cuya utilización puede verse limitada dependiendo de la información con la que se cuente.

Por su gran rendimiento y reconocimiento internacional se optó por utilizar los modelos HBV y SAC-SMA con la finalidad de evaluar su aplicabilidad en lugares donde la información meteorológica puede ser escasa, como frecuentemente ocurre en México. Para lograrlo, se recopiló y validó información meteorológica con la que se montaron y calibraron los modelos HBV y SAC-SMA, utilizando el paquete Hydromad en el lenguaje de programación R. Esto se

hizo en 11 subcuencas que conforman la cuenca del río Tepalcatepec, en el estado de Michoacán.

Se calcularon índices de bondad de ajuste para evaluar el rendimiento de los modelos, donde se observó que ambos tienen una buena representación de los escurrimientos en la zona, con índices de bondad de ajuste medios que van desde 0.60 a 0.83 y 0.60 a 0.90 respectivamente, siendo el modelo SAC-SMA el que supera al modelo HBV en 8 de 11 subcuencas.

Con los resultados obtenidos, se concluyó que, a pesar de la poca información requerida por los modelos utilizados, el rendimiento de estos resultaron ser satisfactorios, lo que demuestra que pueden ser utilizados en el contexto actual del país para poder estudiar la evolución de la disponibilidad de los recursos hídricos.

Palabras clave: modelo lluvia-escurrimiento, modelación hidrológica, HBV, SAC-SMA, cuenca del río Tepalcatepec.

Introducción

La gestión de los recursos hídricos es un desafío clave en regiones con información meteorológica limitada, como ocurre en muchas cuencas de México. Los modelos lluvia-escorrentía se utilizan ampliamente para estimar la disponibilidad de agua y comprender el comportamiento hidrológico de una cuenca. Entre los modelos más reconocidos se encuentran el *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (HBV) (Bergström, 1976) y el *Sacramento Soil Moisture Accounting Model* (SAC-SMA) (Burnash, 1995), ambos empleados para simular el escurrimiento a partir de variables meteorológicas básicas.

En este capítulo se explica un estudio enfocado en la cuenca del río Tepalcatepec, en Michoacán, para evaluar el rendimiento de los modelos HBV y SAC-SMA. (Fig. 12.1)

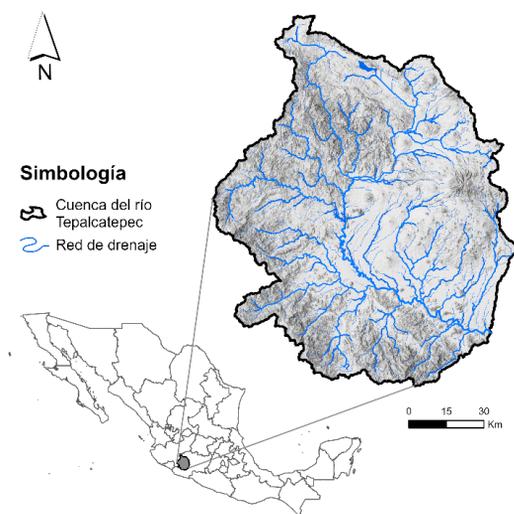


Fig. 12.1 Localización geográfica de la zona de estudio.

La cuenca representa un ejemplo típico de áreas donde la información meteorológica es escasa o de baja calidad, lo que dificulta el uso de modelos complejos. Por ello, la selección de modelos con requerimientos moderados

pero con buen rendimiento es crucial para obtener resultados confiables. El objetivo es comparar el desempeño de los modelos HBV y SAC-SMA en la simulación de escurrimientos en once subcuencas del río Tepalcatepec con el uso de índices de bondad de ajuste, así como evaluar su aplicabilidad para la gestión de los recursos hídricos en México.

Materiales y métodos

El proceso metodológico consistió en recopilar información hidrometeorológica, detectar y corregir inconsistencias en los datos, calcular la evapotranspiración potencial (ETP), montar y calibrar los modelos HBV y SAC-SMA, y evaluar su rendimiento. Los datos meteorológicos se obtuvieron del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de Conagua (2019), y los datos hidrométricos provienen del mismo sistema.

Para detectar inhomogeneidades en los datos meteorológicos, se empleó el paquete de R *Climatol* (Guijarro, 2004), que utiliza la prueba *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT) (Alexandersson, 1986). Las inhomogeneidades se eliminan y los datos faltantes se estiman mediante el método de Paulhus y Kohler (1952), proceso conocido como homogeneización. Además, *Climatol* permite interpolar los datos a los puntos de las cuencas drenadas por las estaciones hidrométricas. Con los datos homogeneizados de temperatura se calculó la ETP usando el método de Hargreaves (1994).

Los datos de precipitación y ETP se introdujeron en el paquete *Hydromad* (Andrews et al., 2011) para montar y calibrar los modelos HBV y SAC-SMA en cada cuenca. La calibración consistió en ajustar los parámetros para lograr el mayor ajuste entre los caudales modelados y los medidos.

Finalmente, se evaluó el rendimiento de los modelos utilizando los siguientes índices de bondad de ajuste: coeficiente de determinación (R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970), *Logarithmic Nash-Efficiency* (NSEln) (Oudin et al., 2006) y *Kling-Gupta Efficiency* (KGE) (Gupta et al., 2009). El criterio de Moriasi et al. (2007) se utilizó para clasificar el rendimiento según NSE (véase Tabla 12.1), aplicable igualmente a los demás índices.

Tabla 12.1 Clasificación general del rendimiento de un modelo en función de NSE.

Clasificación de rendimiento	NSE
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$
No satisfactorio	$NSE \leq 0.50$

Fuente: Modificado de Moriasi et al. (2007).

Resultados y discusión

Como se mencionó, la zona de estudio es la cuenca del río Tepalcatepec, ubicada en Michoacán y Jalisco. En la figura 12. 2 se presenta la localización de las 40 estaciones meteorológicas y las 11 estaciones hidrométricas, así como las cuencas de calibración drenadas por estas estaciones.

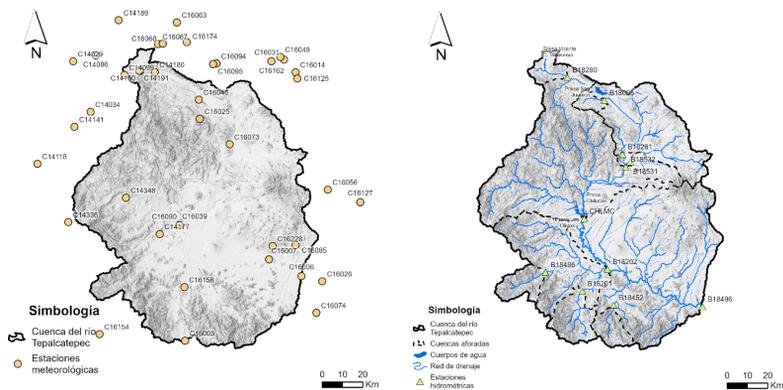


Fig. 12.2. Localización de las estaciones meteorológicas (izquierda) e hidrométricas (derecha) en la zona de estudio.

El periodo de datos es de 1960-2020. Se homogeneizaron e interpolaron los datos de precipitación y temperatura para las 11 cuencas de calibración. Con estos datos se calculó la ETP y se montaron los modelos HBV y SAC-SMA en Hydromad. Tras calibrar los modelos, se obtuvieron los índices de bondad de ajuste presentados en la tabla 12.2.

Tabla 12.2 Índices de bondad de ajuste de los modelos HBV y SAC-SMA para cada cuenca de calibración.								
Clave	HBV				SAC-SMA			
	NSE	NSEln	R2	KGE	NSE	NSEln	R2	KGE
18201	0.53	0.87	0.54	0.56	0.55	0.80	0.56	0.55
18202	0.80	0.90	0.80	0.79	0.73	0.85	0.74	0.85
18452	0.72	0.83	0.72	0.75	0.84	0.84	0.84	0.85
18494	0.76	0.81	0.76	0.84	0.81	0.82	0.81	0.87
18496	0.74	0.84	0.75	0.76	0.78	0.84	0.78	0.85
18095	0.67	0.85	0.67	0.72	0.69	0.88	0.70	0.75
18280	0.85	0.74	0.85	0.87	0.81	0.82	0.84	0.73
18281	0.71	0.62	0.79	0.8	0.88	0.85	0.88	0.92
18531	0.63	0.31	0.65	0.81	0.83	0.86	0.83	0.86
18532	0.61	0.59	0.69	0.80	0.90	0.88	0.90	0.92
CHLMC	0.65	0.49	0.77	0.74	0.74	0.80	0.76	0.87

Fuente: elaboración propia, 2025.

A fin de resumir la información previamente presentada, se promediaron los índices de bondad de ajuste por cada modelo y por cada cuenca, tal como se muestra en la figura 12.3.

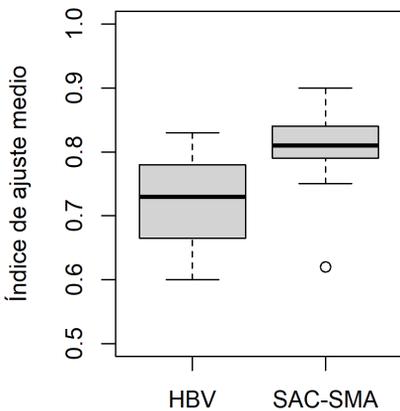


Fig. 12.3. Índice de bondad de ajuste promedio de cada cuenca de calibración, de cada modelo.

Conclusiones

La tabla 12.2 muestra que el modelo SAC-SMA supera al HBV en ocho de las once cuencas de calibración. La figura 12.3 confirma que, además de tener índices promedio mayores, los valores mínimos del SAC-SMA son superiores en la mayoría de los casos.

Aunque el SAC-SMA resulta ser superior, ambos modelos presentan rendimientos satisfactorios a muy buenos, lo que representa adecuadamente los escurrimientos superficiales en la zona de estudio.

Los resultados del estudio demuestran la aplicabilidad de estos modelos en México, lo cual los hace herramientas útiles para simular escurrimientos con datos meteorológicos básicos y para apoyar la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Referencias

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, pp. 661–675.
- Andrews, F. T., Croke, B. F. W., y Jakeman, A. J. (2011). An open software environment for hydrological model assessment and development. *Environmental Modelling & Software*, pp. 1171–1185.
- Bergström, S. (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for scandinavian catchments*, SMHI, p. 134.
- Burnash, J. R. C. (1995). The NWS River Forecast System–Catchment Modeling: Computer models of watershed hydrology, Water Resources Publications, pp. 311–366.
- Comisión Nacional del Agua. (2019). Sistema de Información Hidrológica, <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>
- Guijarro, J. A. (2004). Climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products, p. 4.1.0) [Dataset].
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., y Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, pp. 80–91.
- Hargreaves, G. H. (1991). Defining and Using Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, pp. 1132–1139.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. V., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2002). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations: Transactions of the ASABE*, pp. 885–900.

- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, pp. 282–290.
- Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C., y Michel, C. (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*.
- Paulhus, J. L. H., y Kohler, M. A. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*, pp. 129–133.
- R Core Team. (2002). *R: a language and environment for statistical computing* [Manual]: R Foundation for Statistical Computing.

13 Diseño de infraestructura de recarga de agua pluvial en el AMG: nomogramas para la gestión inteligente del agua

Sofía Limón Ochoa, Yoshiro Susumo Azano Carrillo,
David Vargas del Río, Gil Humberto Ochoa González,
Pablo Enrique Zamudio Zavala, José Manuel Ramírez León
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente,

Resumen

El área metropolitana de Guadalajara (AMG) experimenta dos problemas hidrológicos críticos: escasez de agua durante el estiaje e inundaciones en temporada pluvial. En este capítulo se presenta una investigación que desarrolla una metodología para el diseño de infraestructuras de recarga pluvial, tanto superficial como profunda, que atiende simultáneamente ambas problemáticas.

El estudio se centra en la zona poniente de la AMG, identificada como la más propicia para la recarga de acuíferos. La modelación numérica se realizó mediante el software RocScience, fundamentado en el método de elementos finitos, para

simular la infiltración de agua en los diversos suelos característicos de la región. Los datos obtenidos se procesaron mediante análisis de regresión lineal y se visualizaron a través de Matlab, para generar nomogramas que facilitan el cálculo de caudales de infiltración para el diseño de infraestructuras. Estos instrumentos gráficos facilitan el proceso de diseño y proporcionan una herramienta práctica para la gestión sostenible del agua pluvial. Los resultados demuestran que la implementación de sistemas de recarga de acuíferos constituye una solución viable para mitigar la escasez hídrica y controlar las inundaciones en la región.

Palabras clave: recarga en superficie, recarga en profundidad, infiltración, recarga y acuíferos, diseño de infraestructuras de recarga pluvial.

Introducción

El área metropolitana de Guadalajara (AMG) ha experimentado un crecimiento demográfico acelerado desde la década de 1950, fenómeno que ha transformado significativamente la morfología urbana y las dinámicas hidrológicas del territorio. La expansión urbana acelerada ha resultado en una impermeabilización extensiva del suelo, lo cual altera drásticamente los patrones naturales de infiltración y escorrentía. Esta modificación del ciclo hidrológico natural se manifiesta en una reducción sustancial de la capacidad de retención y filtración del agua pluvial lo que genera un incremento en el volumen y la velocidad de los escurrimientos superficiales hacia las zonas topográficamente deprimidas (López, 2015).

La problemática hidrológica de la AMG se caracteriza por una marcada dualidad estacional: inundaciones recurrentes durante el periodo pluvial y escasez hídrica significativa en la temporada de estiaje. Ante este escenario, la implementación de sistemas de infiltración controlada emerge como una solución integral que podría abordar simultáneamente ambos desafíos mediante la recarga artificial de acuíferos. La zona poniente de la ciudad presenta condiciones particularmente favorables para esta estrategia, debido a su conexión hidrológica con el bosque La Primavera, un área natural protegida que genera escurrimientos de alta calidad. En esta región, el nivel freático se encuentra a una profundidad aproximada de 144 metros (IMEPLAN y Enlace Ambiental, 2024), lo que ofrece un volumen significativo para el almacenamiento subterráneo.

Esta investigación se enfoca en el análisis de la infiltración potencial en diversos perfiles estratigráficos que caracterizan los suelos pumíticos de la región (Zamudio-Zavala et al., 2018). El diseño de sistemas de recarga artificial de acuíferos requiere la estimación precisa del caudal de infiltración, un proceso complejo que involucra múltiples variables hidrogeológicas: propiedades físicas del suelo, conductividad hidráulica, profundidad del nivel freático y la resolución de ecuaciones diferenciales no lineales. Tradicionalmente, este análisis ha dependido de software especializado para simulaciones numéricas, lo que ha limitado la accesibilidad e implementación práctica de estas tecnologías. Este estudio facilita el procedimiento de análisis y diseño, mediante nomogramas para la estimación de caudales de recarga, tanto superficial como profunda.

La metodología incluyó modelaciones numéricas utilizando el software RocScience, basado en el método de elementos finitos, abarcando el espectro granulométrico característico del subsuelo regional. Los resultados de estas simulaciones fueron procesados mediante regresión lineal múltiple y visualizados con Matlab para generar herramientas gráficas que simplifican significativamente el proceso de diseño.

Este trabajo fue elaborado por un equipo compuesto por dos estudiantes, Sofía Limón Ochoa y Yoshiro Susumo Azano Carrillo, quienes lo realizaron como su proyecto de aplicación profesional de la licenciatura en ingeniería civil. Los profesores David Vargas del Río, Gil Humberto Ochoa González, Pablo Enrique Zamudio y José Manuel Ramírez León brindaron su valiosa experiencia y conocimiento en el campo, al guiar el proceso de investigación y garantizar la rigurosidad académica del trabajo. Juntos crearon un enfoque integral que combina la innovación estudiantil con la experiencia docente, resultando en un estudio sólido y relevante.

Materiales y métodos

El objetivo principal de la investigación fue desarrollar nomogramas que permitieran estimar los caudales de infiltración en función de las características geométricas de las estructuras de recarga y las propiedades hidrogeológicas del subsuelo. El estudio se centró en la estimación de la recarga en los suelos característicos de la AMG, que suelen presentarse con estratos de materiales pumíticos con diferentes coeficientes de permeabilidad (0.0001-0.002 m/s). En estos suelos se realizó una modelación numérica mediante el software RockScience, con base en el método de elementos finitos, considerando las propiedades físicas y mecánicas específicas de cada tipo de suelo.

Se plantearon dos configuraciones de recarga en la simulación:

1. Recarga superficial

- Diámetro de infiltración: 80 metros
- Profundidades evaluadas: 1, 5, 10 y 15 metros
- Simulación para cuatro tipos de suelo: 0.0001, 0.0007, 0.001, 0.002 m/s

2. Recarga profunda

- Diámetro de perforación: 1 metro

- Profundidades evaluadas: 10, 20, 50, 100 y 130 metros
- Simulación para cuatro tipos de suelo: 0.0001, 0.0007, 0.001, 0.002 m/s

Las simulaciones numéricas proporcionaron datos de caudales de infiltración para cada configuración geométrica y tipo de suelo (Fig. 13.1).

Posteriormente se realizó un análisis de regresión múltiple utilizando Matlab para desarrollar expresiones matemáticas que permitieran la construcción de nomogramas. Estos instrumentos gráficos facilitan la estimación de caudales de infiltración, tanto para sistemas de recarga superficial como profunda, simplificando significativamente el proceso de diseño.

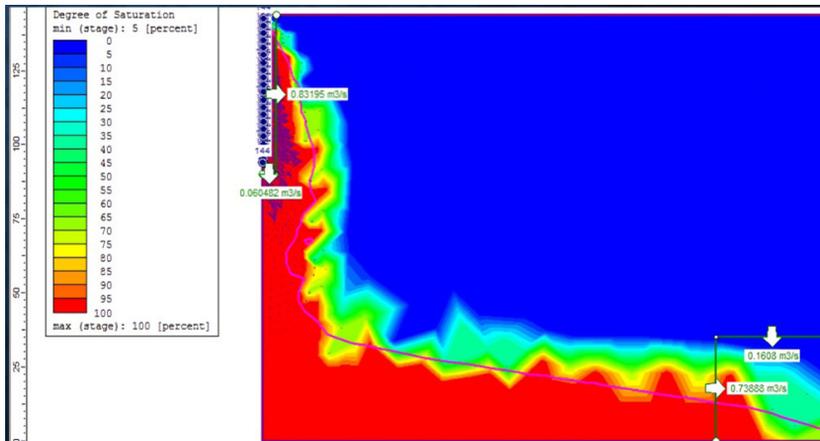


Fig. 13.1. Simulación numérica que proporciona datos de caudales de infiltración para cada configuración geométrica y tipo de suelo.

Resultado y discusión

Las simulaciones numéricas realizadas sobre el espectro granulométrico característico de los suelos de esta región, seguidas de un análisis de regresión lineal múltiple de los resultados y su representación gráfica, permitieron desarrollar un modelo generalizado que establece la relación entre tres variables críticas en el proceso de infiltración: la permeabilidad del suelo, el caudal de infiltración y la profundidad de la estructura.

Los nomogramas resultantes, presentados en las figuras 13.2 y 13.3, constituyen herramientas gráficas que permiten dimensionar estructuras de infiltración tanto profundas como superficiales. Estos instrumentos permiten obtener el caudal de recarga en cualquier perfil estratigráfico compuesto por materiales pumíticos de esta región, cómo es común, a partir de una permeabilidad equivalente, es decir, una permeabilidad ponderada.

La versatilidad de estos nomogramas radica en su aplicabilidad práctica, lo que facilita significativamente el proceso de diseño de sistemas de recarga artificial de acuíferos.

Para la recarga profunda (Fig. 13.2), el nomograma relaciona la profundidad de perforación con el caudal de infiltración esperado para diferentes valores de permeabilidad, mientras que para la recarga superficial (Fig. 13.3), se establece la relación entre el área de infiltración y el caudal esperado en función de la permeabilidad del suelo.

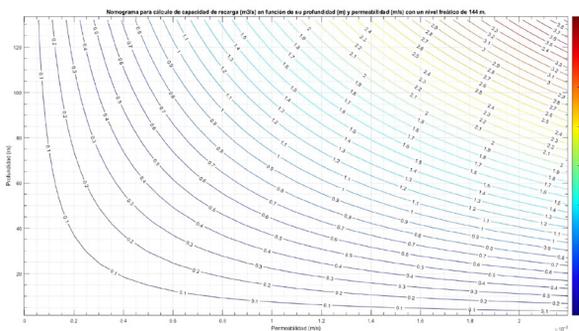


Fig. 13.2. Infiltración profunda.

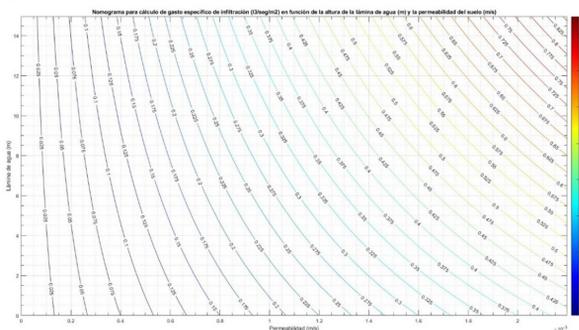


Fig. 13.3. Infiltración superficial.

Conclusiones

La representación mediante nomogramas, fundamentados en simulaciones numéricas, simplifica el proceso de estimación de caudales. Estos diagramas permiten una interpretación visual rápida y precisa de la relación entre variables críticas, como la permeabilidad del suelo, la profundidad de la estructura y el caudal de infiltración. Al simplificar la complejidad de los cálculos, los nomogramas facilitan la toma de decisiones técnicas en campo, proporcionando una herramienta práctica para proyectistas e ingenieros que necesitan estimar caudales de manera eficiente sin recurrir a software especializado en cada instancia.

Referencias

- Imeplan y Enlace Ambiental. (2024). *Estudio de hidrología subterránea en el área metropolitana de Guadalajara*. Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara.
- Zamudio-Zavala, P. E., Ochoa-González, G. H. y Vargas del Río, D. (2018). Correspondencia entre propiedades índice versus mecánicas y permeabilidad en arenas limosas pumíticas. *Memorias de la XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.

14 Hidrograma unitario adimensional para cuencas con o sin medición de escurrimientos

José Óscar Guerrero Angulo
Jesús Eduardo Ceceña Osuna
Sistemas Hidráulicos, Culiacán
Eduardo Chan Gaxiola
Comisión Nacional del Agua

Resumen

En este capítulo se presenta un estudio que propone un hidrograma unitario sin dimensiones, en el que el tiempo y duración de la lluvia en exceso se dividen entre el tiempo de concentración, y el caudal se divide entre el caudal de equilibrio, lo que resulta en caudales por una unidad del caudal de equilibrio, que arroja un hidrograma unitario adimensional que permite obtener en el proceso de convolución, también hidrogramas adimensionales para

duraciones de lluvia mayores a la del hidrograma unitario, con abscisas 0 a 2.0 y ordenadas de 0 a 1.0.

La ventaja de este hidrograma unitario adimensional es que también se obtiene la curva S en forma adimensional y se puede aplicar a otras cuencas con características similares. Adicionalmente, se propone la forma de obtener la duración de la lluvia y el hidrograma que corresponde al caudal máximo, apoyados de las curvas I-d-Tr.

Palabras clave: hidrograma unitario adimensional, cuencas, medición de escurrimientos, caudal máximo, curva S, tiempo de concentración.

Introducción

En este capítulo se propone un hidrograma unitario sin dimensiones, donde el tiempo y duración de la lluvia en exceso se dividen entre el tiempo de concentración y el caudal se divide entre el caudal de equilibrio, lo que resulta en caudales por una unidad del caudal de equilibrio que arroja un hidrograma unitario adimensional que permite obtener en el proceso de convolución; también hidrogramas adimensionales para duraciones de lluvia mayores a la del hidrograma unitario, con abscisas 0 a 2.0 y ordenadas de 0 a 1.0. Se obtiene también la curva S en forma adimensional que puede aplicarse a otras cuencas con características similares.

Es común la falta de medición de escurrimientos, y una forma conveniente de obtener un hidrograma adimensional para cuencas naturales es usar los datos del hidrograma unitario triangular del U. S. Bureau of Reclamation (USBR) (1974) y del hidrograma unitario curvilíneo del U. S. Soil Conservation Service (USSCS) (Mockus 1957). Se menciona que este último es un hidrograma adimensional, sin embargo, este se apoya en el hidrograma unitario triangular del USBR que tiene dimensiones, por lo que el hidrograma que resulta no es adimensional. La solución se ha encontrado transformando al hidrograma triangular en adimensional, con lo cual se han convertido los resultados de la USSCS en un hidrograma unitario adimensional, del cual también se ha obtenido la curva S en forma adimensional.

Descripción de un hidrograma

De acuerdo con Sherman (Aparicio, 2006), el tiempo base de un hidrograma para una cuenca dada, se considera que es constante para todas las tormentas con la misma duración de la lluvia en exceso. Con base en lo anterior, el tiempo base se obtiene de la siguiente manera:

$$t_b = d_e + T_c \quad (1)$$

Donde:

t_b = tiempo base

d_e = duración de la lluvia en exceso

T_c = tiempo de concentración, los tres tiempos en horas

Témez (1978) también concluye que el tiempo base se describe con la ecuación 1. Mas delante se obtiene que el hidrograma unitario para una cuenca natural, le corresponde un tiempo de concentración mayor al usado en el método del hidrograma unitario triangular del USBR (1974), de lo cual se puede expresar:

$$\frac{T_c}{t_c} = k \quad (2)$$

Donde:

t_c = tiempo de concentración en h usado en el hidrograma triangular del USBR

k = constante que se obtiene con la ecuación 15, la cual depende del hidrograma unitario, con valores de $k \geq 1.0$.

La ecuación 1 también se puede presentar:

$$\frac{t_b}{T_c} = C + 1 \quad (3)$$

$$\frac{t_b}{t_c} = c + k \quad (4)$$

Donde:

$$C = d_e/T_c$$

$$c = d_e/t_c$$

Cabe señalar que las ecuaciones 1, 3 o 4 son válidas para cualquier hidrograma, distribución temporal y duración de la lluvia en exceso. En particular, para un hidrograma unitario el tiempo de pico se obtiene con las siguientes expresiones:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (5)$$

$$\frac{t_p}{T_c} = \frac{1}{2} C + \frac{t_r}{T_c} \quad (6)$$

$$\frac{t_p}{t_c} = \frac{1}{2} c + \frac{t_r}{t_c} \quad (7)$$

Donde:

t_p = tiempo de pico

t_r = tiempo de retraso al pico, ambos en horas.

Los valores de t_r/T_c y t_p/t_c dependen de C y c , respectivamente, del hidrograma unitario. Para otras duraciones, el hidrograma se obtiene aplicando el proceso de convolución considerando la temporalidad de la lluvia en exceso.

Hidrograma unitario adimensional

Un hidrograma unitario se obtiene normalmente dividiendo el caudal del escurrimiento directo entre la altura de lluvia en exceso, lo que da como resultado hidrogramas de caudales por una unidad de altura de lluvia en exceso, con unidades en la abscisa y en la ordenada. Sin embargo, se obtienen hidrogramas unitarios sin dimensiones en los dos ejes; para la abscisa conviene dividir el tiempo entre el tiempo de concentración, y para la ordenada dividir el caudal entre el caudal de equilibrio.

Por ejemplo, el hidrograma de escurrimiento directo de la figura 8.7 que se muestra en el libro de Aparicio (2006), con una duración de la lluvia en exceso de dos horas, una altura de lluvia en exceso de 5 mm, y un área de la cuenca de 1080 km². Los datos en el tiempo en horas son 0, 2, 6, 8 y 18, y sus correspondientes caudales en m³/s son 0, 100, 200, 100 y 0.

Con la duración de la lluvia de 2 horas y un tiempo base de 18 horas, de la ecuación 1 se obtiene el tiempo de concentración T_c de 16 horas. El tiempo y duración de la lluvia en exceso se dividen entre el tiempo de concentración de 16 horas, y el caudal se divide entre el caudal de equilibrio lo que da por resultado un caudal por una unidad del caudal de equilibrio, que lo podemos representar por la letra K .

El caudal de equilibrio se obtiene al multiplicar la intensidad efectiva de la lluvia por el área de la cuenca, cuyo resultado es 0.277778(5.0 mm/2h) (1080 km²) = 750.0 m³/s. Se obtienen así, hidrogramas con valores adimensionales, con abscisas 0 a 2.0 y ordenadas de 0 a 1.0, como se muestra en la figura 14.1.

El hidrograma unitario adimensional para una duración de 2 horas, equivalente a $C = d_c/T_c = 0.125$ se muestra en la figura 14.1. El hidrograma de escurrimiento directo de una tormenta se obtiene multiplicando la ordenada del hidrograma por la intensidad efectiva de la lluvia y por el área de la cuenca.

Con base en el hidrograma unitario se aplica el proceso de convolución tomando constante la intensidad efectiva de la lluvia para obtener los hidrogramas con duraciones mayores a 2 h, hasta llegar al tiempo de concentración de 16 h, equivalente a $d_c/T_c = 1.0$. Este último corresponde a la curva S, con un valor constante en la ordenada de 1.0 para $t/T_c > 1.0$. Esta curva S adimensional se puede aplicar a otras cuencas con características similares.

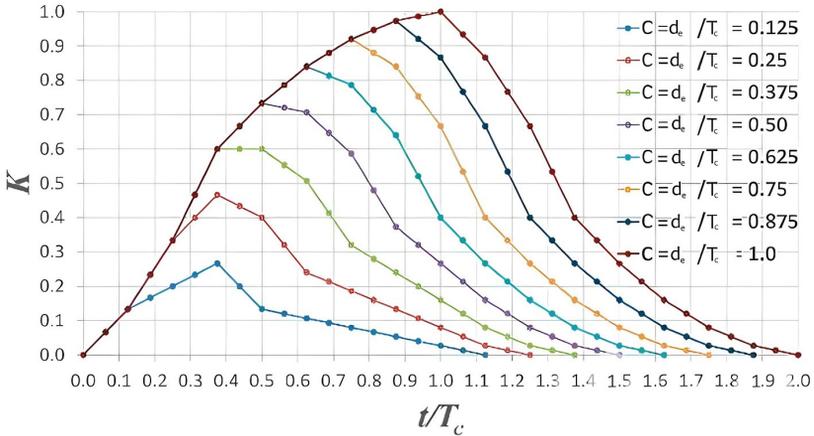


Fig. 14.1. Hidrogramas adimensionales.

Obtención del hidrograma unitario adimensional

La medición de escurrimientos en la cuenca en un lapso de tiempo razonable permite registrar diferentes intensidades efectivas de la lluvia y obtener el hidrograma unitario adimensional instantáneo, dividiendo las ordenadas del hidrograma entre el área de la cuenca. Se sabe que el número de ordenadas del hidrograma de escurrimientos es igual al número de barras de intensidad más el número de ordenadas del hidrograma unitario menos 1.0. Por ejemplo, si se tienen dos barras de intensidad diferentes y cinco valores de caudal del hidrograma de escurrimiento directo, el número de ordenadas del hidrograma unitario son cuatro, donde el sistema de ecuaciones que debe resolverse es el siguiente.

$$Q_1/0.277778A = Ie_1 K_1 \tag{8a}$$

$$Q_2/0.277778A = Ie_1 K_2 + Ie_2 K_1 \tag{8b}$$

$$Q_3/0.277778A = Ie_1 K_3 + Ie_2 K_2 \quad (8c)$$

$$Q_4/0.277778A = Ie_1 K_4 + Ie_2 K_3 \quad (8d)$$

$$Q_5/0.277778A = \quad + Ie_2 K_4 \quad (8e)$$

Donde:

Q_i = caudal en m³/s

A = área de la cuenca en Km²

Ie_i = intensidades efectivas registradas en mm/h

K_i = ordenadas del hidrograma adimensional.

Es un sistema indeterminado con cinco ecuaciones y cuatro valores de K como incógnitas, cuya solución se obtiene aplicando un método de optimización o el método de la matriz transpuesta.

Hidrograma unitario adimensional usando los datos del USSCS

Una forma de obtener un hidrograma adimensional para cuencas naturales es utilizar los datos del hidrograma unitario curvilíneo del USSCS (Mockus, 1957) y del hidrograma unitario triangular del USBR (1974), en donde se propone $t_p/t_c = 0.60$, por lo que el tiempo de pico es:

$$\frac{t_p}{t_c} = \frac{1}{2} c + 0.60 \quad (9)$$

$$\frac{t_p}{T} = \frac{1}{2} C + 0.60/k \quad (10)$$

En el hidrograma del USSCS se considera que la base del hidrograma triangular corresponde a $2.67 t_p$. El hidrograma triangular no define el tiempo base del hidrograma curvilíneo, por lo que el tiempo base del hidrograma triangular lo hemos definido como tiempo base equivalente $t_{be} = 2.67t_p$, como se muestra en la gráfica de la figura 14. 2, por lo que:

$$\frac{t_{be}}{t_c} = 1.335c + 1.602 \quad (11)$$

$$\frac{t_{be}}{T_c} = 1.335C + 1.602/k \quad (12)$$

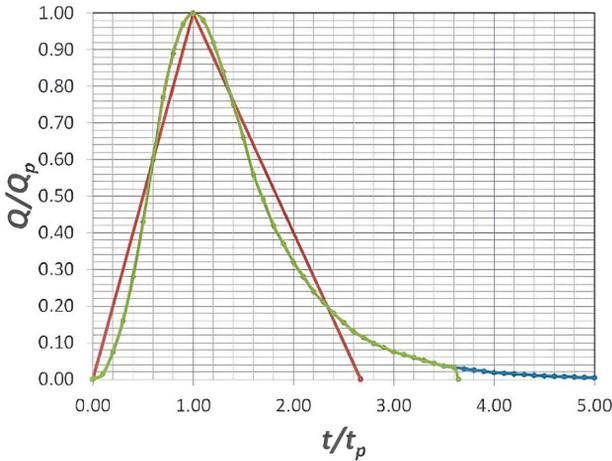


Fig. 14.2. Hidrograma unitario curvilíneo de USSCS.

El volumen de la lluvia sobre la cuenca es el producto $hp_e A$, donde:

hp_e = altura de lluvia en exceso en m

A = área de la cuenca en m^2

Por otro lado, el volumen de la lluvia también es igual al volumen del hidrograma, de donde se obtiene:

$$Q_p / \frac{hp_e}{d_e} A = K_p \quad (13)$$

Donde K_p se obtiene con la expresión siguiente:

$$K_p = 2 \frac{d_e}{t_{be}} = 2 \frac{c}{t_{be}/t_c} = 2 \frac{C}{t_{be}/T_c} \quad (14)$$

y hp_e/d_e es la intensidad efectiva de la lluvia.

El producto de esta intensidad por el área de la cuenca corresponde al caudal de equilibrio, indicando que K_p es el caudal de pico del hidrograma por una unidad de caudal de equilibrio, el cual es adimensional con valores de 0 a 1.0.

Para una mayor descripción temporal del hidrograma conviene usar hidrogramas unitarios de pequeña duración de lluvia en exceso, para lo cual el USBR (1974) aconseja valores de $c \leq 1/5$. La relación entre los tiempos de concentración T_c y t_c se obtiene con base en la propuesta del hidrograma unitario curvilíneo del USSCS, ya que en este se define el tiempo base del hidrograma (figura 14.2), de donde se obtiene $t_b/t_p = 5$, lo cual debe corresponder al hidrograma unitario triangular equivalente con un valor de $t_b/t_p = 2.67$.

Sin embargo, el área del hidrograma triangular de la figura 14.2 es de 1.335 y el hidrograma curvilíneo del USSCS supera este valor. Para que sean iguales se propone modificar el hidrograma curvilíneo en la parte final, como lo muestra la gráfica en color verde de la figura 14.2, resultado un valor de $t_b/t_p = 3.6451$.

Cabe señalar que este valor es el que determina el tiempo base y el tiempo de concentración, dependiendo de la duración de la lluvia en exceso del hidrograma unitario para $c \leq 1/5$. Con el valor de $t_b/t_p = 3.6451$ y las ecuaciones 1 y 9 se obtiene la ecuación 2, donde:

$$k = 0.82255c + 2.18706 \quad (15)$$

Con las definiciones $C = d_e/T_c$ y $c = d_e/t_c$ y la ecuación 2 se obtiene:

$$C = \frac{c}{k} \quad (16)$$

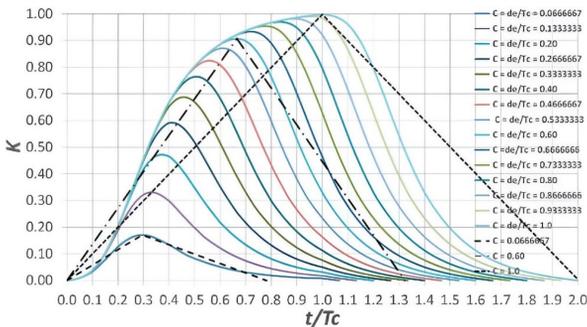


Fig. 14.3. Hidrograma adimensional para diferentes $C = d_e/T_c$

k es una constante que depende del valor de c asignado al hidrograma unitario, el cual se aconseja $c \leq 1/5$.

Con un valor de $c = 1/5$ en la ecuación 15 se obtiene $k = 2.35157$, y de la ecuación 16 el resultado es $C \leq 0.085$. Si se utilizan 15 incrementos de $C = d_e/T_c$ el incremento se obtiene dividiendo la unidad entre 15, por lo que cada uno debe ser de $1/15$, el cual es menor de 0.085 .

Con el valor de $C = 1/15$, de las ecuaciones 15 y 16 se obtiene $k = 2.31395$ y $c = 0.1542633$. Con $C = 1/15$ y $k = 2.31395$, de las ecuaciones 3, 10 y 12 se obtiene $t_b/T_c = 1.066667$, $t_p/T_c = 0.292630$, y $t_{be}/T_c = 0.781323$, respectivamente, y con el valor de $t_{be}/T_c = 0.781323$ y $C = 1/15$, de la ecuación 14 se obtiene $K_p = 0.170651$.

El hidrograma unitario adimensional para $C = d_e/T_c = 1/15$ se muestra en la figura 14.3. De la ecuación 14 se obtiene que C corresponde al área del hidrograma triangular. Aplicando el proceso de convolución considerando constante la intensidad efectiva de la lluvia, se obtienen los hidrogramas para los incrementos de $C = d_e/T$ hasta llegar al tiempo de concentración para $C = d_e/T_c = 1.0$ que se muestran en la figura 14.3.

Este último corresponde a la curva S, tomando un valor constante en la ordenada de 0.998799 para $t/T_c > 1.0$. El valor de 0.998799 en lugar de 1.0 se debe a pequeños errores en el proceso.

La ecuación de la curva S definida por K_S es la siguiente.

Para $0 \leq t/T_c \leq 0.40$

$$K_S = 216.70287(t/T_c)^6 - 78.041042(t/T_c)^5 - 97.697908(t/T_c)^4 + 51.901858(t/T_c)^3 - 1.904428(t/T_c)^2 + 0.160889(t/T_c) \quad (17)$$

Para $0.40 \leq t/T_c \leq 1.0$, se define $\alpha_1 = t/T_c - 0.40$

$$K_S = 4.847113\alpha_1^6 - 7.91925\alpha_1^5 + 2.973105\alpha_1^4 + 2.65868\alpha_1^3 - 3.417215\alpha_1^2 + 1.650478\alpha_1 + 0.66877431 \quad (18)$$

Para $t/T_c > 1.0$, $K_S = 0.998799$

La ecuación del hidrograma definida por K_H es la siguiente

$$K_H = K_S - K_C \quad (19)$$

Donde K_C es la ecuación.

Para $d_e/T_c \leq t/T_c \leq d_e/T_c + 0.40$, se define $\alpha_2 = t/T_c - d_e/T_c$

$$K_c = 216.70287\alpha_2^6 - 78.041042\alpha_2^5 - 97.697908\alpha_2^4 + 51.901858\alpha_2^3 - 1.904428\alpha_2^2 + 0.160889\alpha_2 \quad (20)$$

Para $d_e/T_c + 0.40 \leq t/T_c \leq d_e/T_c + 1.0$, se define $\alpha_3 = t/T_c - (d_e/T_c + 0.40)$

$$K_c = 4.847113\alpha_3^6 - 7.91925\alpha_3^5 + 2.973105\alpha_3^4 + 2.65868\alpha_3^3 - 3.417215\alpha_3^2 + 1.650478\alpha_3 + 0.66877431 \quad (21)$$

Para diferentes valores de C se obtuvieron los de t_p/T_c , K_p y t_{be}/T_c , donde t_{be}/T_c se obtuvo de la ecuación 14. Mediante un ajuste a los resultados, las ecuaciones son las siguientes

$$\frac{t_p}{T_c} = -0.2571C^3 + 0.5816C^2 + 0.4094C + 0.2661 \quad (22)$$

$$\frac{t_{be}}{T_c} = -0.6235C^3 + 1.7669C^2 + 0.0921C + 0.7645 \quad (23)$$

$$K_p = 1.2282C^3 - 3.2876C^2 + 3.0812C - 0.0218 \quad (24)$$

Las ecuaciones 22 a 24 corresponden a un hidrograma triangular de forma adimensional válido para $1/15 \leq C \leq 1.0$. De las ecuaciones 6 y 22, el tiempo de retraso al pico es:

$$\frac{t_r}{T_c} = -0.2571C^3 + 0.5816C^2 - 0.0906C + 0.2661 \quad (25)$$

En la figura 14. 3 se muestran los hidrogramas triangulares para tres valores de C , 1/15, 0.60 y 1.0, donde se aprecia que a medida que aumenta el valor de C , el hidrograma triangular más se aparta de la forma del hidrograma total de la crecida.

Con las ecuaciones 22 y 24 se define uno de los puntos importantes del hidrograma curvilíneo, y para una mayor descripción se aconseja obtener el tiempo base con la ecuación 3, o aplicar las ecuaciones 17 a 21.

Conclusiones

En cuencas pequeñas o urbanas se puede aprovechar y considerar válida la propuesta para obtener los hidrogramas con valores de $1/15 \leq C < 1.0$. La

duración de la lluvia y el hidrograma que corresponde al caudal máximo se obtiene apoyados en las curvas $I-d-T_r$ y como el área de la cuenca es constante, el caudal corresponde al producto de K máximo (K_p) por su correspondiente intensidad efectiva de la lluvia, ambos en función de C .

La curva $I-d$, que corresponde a un periodo de retorno T_r , generalmente se ajusta a una ecuación potencial $I = aC^x$, donde I es la intensidad de la lluvia en mm/h, a es una constante que depende del tiempo de concentración T_c y x es otra constante que depende de T_r , encontrando que el caudal máximo no depende de T_c .

Se ha resuelto un ejemplo para encontrar el caudal máximo ($K_p I_{máx}$) para los T_r de 10 y 100 años. Los datos de $I-d$ para un T_r de 10 años arrojan un valor de $x = 0.73848$, donde se obtiene que el caudal máximo corresponde al valor de $C = 0.2522$ y $K_p = 0.5666$. Los datos de $I-d$ para un T_r de 100 años arrojan un valor de $x = 0.7122$, encontrando que el caudal máximo corresponde al valor de $C = 0.272$ y $K_p = 0.5979$.

Referencias

- Aparicio M., F. J. (2006). *Fundamentos de hidrología de superficie*, LIMUSA.
- Comisión Nacional del Agua. (1987). *Instructivo de Hidrología para Determinar la Avenida Máxima Ordinaria*.
- Mockus, V. (1957). *Use of Storm and watershed characteristics in syntetic unit hydrograph and application*, U.S. Soil Conservation Service.
- Témez, J. R. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Carreteras.
- U. S. Bureau of Reclamation (1974). *Design of Small Dams*. U. S. Department of the Interior.

15 Propuestas para mejora del marco jurídico de manejo del agua restaurada

Juan Pablo Del Conde Guadalajara
Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C.

Resumen

El crecimiento de la población y su consecuente demanda de agua han causado la sobreexplotación de acuíferos, con deterioro en la calidad del agua y la reducción del caudal de los pozos, en perjuicio del servicio de abastecimiento de agua potable. Las cuencas y acuíferos sin disponibilidad comprenden la mayor parte del territorio nacional y en muchos casos carecen de nuevas fuentes factibles de abastecimiento.

La norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021, “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, señala que las fuentes no deben ser de aguas residuales tratadas. En cuanto a la recarga artificial de acuíferos, la NOM-014-CONAGUA-2003, “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual trata-

da”, establece los requisitos para utilizar agua tratada en la recarga, con estándares que protegen reservas aptas para uso público.

Principalmente en las grandes ciudades, el potencial del aprovechamiento de agua restaurada para su reúso o para la recarga de acuíferos, representa un área de oportunidad rezagada, de máxima importancia para disminuir la sobreexplotación y la insuficiencia de agua para el uso público. Una de las causas de tal rezago es la dificultad para cumplir con los requisitos establecidos en las NOM 127 y 014.

En el capítulo se ejemplifican los casos de la Ciudad de México, Aguascalientes y Baja California, con una descripción de los beneficios de una estrategia de mayor valoración del agua y economía circular.

Palabras clave: abastecimiento de agua potable, recarga artificial de acuíferos, aguas residuales tratadas, aprovechamiento de agua restaurada.

Antecedentes

En 2023 en México se registraron 114 acuíferos sobreexplotados, concentrados en el Valle de México, cuencas centrales del norte, Lerma–Santiago Pacífico, Noroeste, Pacífico Norte y Río Bravo, lo que produce un desequilibrio hasta hoy crónico y en la mayoría de los casos creciente e insostenible.

Las cuencas sin disponibilidad y los acuíferos sobreexplotados ocasionan casos donde el suministro es inferior a 100 l/(hd) en consumo doméstico, y la calidad del agua llega a ser menor que la que podrían tener los caudales de retorno urbanos, por medio de un tratamiento terciario o superior.

La calidad del agua en los acuíferos y cuencas sin disponibilidad tiende a deteriorarse debido a la creciente presión sobre el recurso hídrico, así como a una constante y, a veces creciente sobreexplotación, que agota las reservas acuíferas más recientes y de mejor calidad. Como consecuencia, la calidad de vida en dichas zonas se encuentra a la baja.

La norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021, “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, dentro de sus especificaciones sanitarias señala que “El agua de los sistemas de abastecimiento no debe tener como fuente de abastecimiento agua residual tratada”. Por otra parte, la NOM-014-CONAGUA-2003 señala que los sistemas de recarga, ya sean superficiales, subsuperficiales o directos, deben cumplir con los límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, ya sea en su influente, o en su influente mejorado mediante las capacidades filtrantes del medio poroso.

No obstante, debido a la situación descrita, un porcentaje de la población utiliza agua que incumple con la NOM 127 y/o presenta un suministro discontinuo e insuficiente. Es común que los problemas de cantidad y calidad se encuentren conjugados debido a que, ante un déficit volumétrico, la población se ve obligada a utilizar agua, aunque presente una mala calidad. Numerosos acuíferos, ya sea por la sobreexplotación o por la contaminación, presentan zonas con una calidad que incumple parámetros establecidos en la NOM 127.

En diversas localidades y acuíferos, de hecho, existen prácticas de reúso incidental o accidental, de aguas residuales para uso público, ya que los ríos y acuíferos que constituyen fuentes de abastecimiento se encuentran contaminados por las descargas.

Muchos de esos casos cuentan con plantas de tratamiento de las aguas residuales que podrían ser objeto de un tratamiento terciario, ya sea para sustituir agua actualmente suministrada con peor calidad o para realizar la recarga de acuíferos que presentan serios problemas de contaminación.

Hipótesis

Existen zonas del país donde el agua restaurada mejoraría la calidad del agua en los acuíferos, y el suministro a la población, sin embargo, la NOM-127-SSA1-2021 y la NOM-014-CONAGUA-2003 establecen algunas condiciones inalcanzables que lo impiden en la práctica. Flexibilizar los límites máximos permisibles de los parámetros de calidad del agua, tanto para la NOM 127 como para la NOM 014, permitiría sustituir el uso de agua proveniente de fuentes sobreexplotadas y contaminadas, por agua restaurada sustentable y de mejor calidad, con un beneficio a la salud y al ambiente.

Propuestas

De acuerdo con lo descrito hasta este punto, se presentan dos propuestas para mejora del marco jurídico de manejo del agua restaurada, que se explican a continuación.

1. Cuando el agua restaurada supera en calidad a la suministrada. Algunas localidades cuentan con una cultura de aprovechamiento de agua no bebible en sus redes que, por la problemática local, carece de calidad apropiada. El agua suministrada en esas localidades en muchos casos proviene de la sobreexplotación y, día con día, su calidad empeora. Otorgar un mayor valor al agua residual tratada, para darle un tratamiento terciario, de ósmosis inversa o similar, ofrece dos ventajas: una mejor oferta en términos de continuidad, calidad y cantidad, y la posible sustitución de captaciones que sobreexplotan los acuíferos.

Es conveniente plantear dichos casos como de excepción para la NOM-127, pues resulta benéfico el suministro de agua residual potabilizada en lugar de la condición actual. En su caso, se recomienda acompañarlas con oferta de agua bebible en garrafrones u otras medidas aplicables (por ejemplo filtros intradomiciliarios).

2. Cuando el agua restaurada supera en calidad a la subterránea. Algunos acuíferos en el país presentan serios problemas de calidad del agua pues su reserva presenta menor calidad que el agua restaurada o tratada. En estos casos, existen alternativas de infiltrar agua tratada con mucho mejor calidad que la del acuífero, lo que conllevaría beneficios tanto para la estabilización del acuífero como para su calidad, con mejora en la calidad de dicha agua como fuente de abastecimiento.

También es conveniente plantearlos como casos de excepción, donde la recarga sería benéfica sin necesidad de cumplir estrictamente con NOM-014, distancias de flujo subterráneo, ni tiempos de residencia. Se recomienda que como metas de mediano y largo plazo, se incluyan medidas para la remediación y mejoramiento permanente de la calidad del acuífero.

Casos donde aplicarían las excepciones para NOM-127-SSA1-2021 y NOM-014-CONAGUA-2003

A continuación, se ejemplifican tres casos donde aplicarían las excepciones previamente citadas.

Caso 1. Valle de México en zona oriente de la Ciudad de México: Iztapalapa, Tláhuac y Milpa Alta, tanto por escasez, como por mala calidad en diversas colonias. En el Estado de México: Chalco, Nezahualcóyotl, entre otros.

El planteamiento clave consiste en reconocer que parte del efluente al Valle de Tula proviene de la sobreexplotación de los acuíferos, situación insostenible que no justifica una obligatoriedad porque compromete el equilibrio hídrico de los acuíferos. Es necesario llevar a cabo las acciones para la restauración de los retornos de agua de la urbe a nivel terciario o cuaternario, para completar el suministro de zonas que presentan insuficiencia en volumen o muy deficiente calidad así como implementar proyectos de recarga de acuíferos.

El orden de magnitud de estas obras es comparable con los grandes proyectos regionales de abastecimiento: 27 m³/s de 85 m³/s provienen de la sobreexplotación; 19 m³/s provienen de los sistemas Lerma y Cutzamala, 46 m³/s. Por consiguiente, se deben a fuentes que superan el equilibrio interno de la cuenca, lo que equivale a un 54% del agua utilizada en esta.

Así puede confirmarse que el 54% de los 50 m³/s efluentes de la cuenca, 27 m³/s tienen dicho origen. Hoy día, la reutilización de dicho caudal podría

contribuir a la solución de la sobreexplotación, así como resolver la insuficiencia de agua.

Caso 2. Aguascalientes a través del proyecto “Agua Segura”. Este propone el uso de 2.9 m³/s de agua restaurada en cinco plantas de tratamiento existentes que pueden adecuarse para lograr un tratamiento terciario, para enviar dicho caudal a la presa Plutarco Elías Calles, con una recuperación de 2 m³/s para enviarse a una planta potabilizadora en un tratamiento cuaternario para el suministro en la Ciudad de Aguascalientes. Los beneficios para la población es contar con una nueva fuente de abastecimiento, para el ambiente, disminuir la sobreexplotación.

Caso 3. Zona Costa de Baja California donde el trasvase desde la cuenca del río Colorado, hacia los municipios de Tecate, Tijuana, Playas de Tijuana y Ensenada, son cada día más difíciles. Además, el agua provista mediante el acueducto Río Colorado–Tijuana (4 m³/s) carece de una calidad óptima, por lo cual la población no bebe agua de la llave al considerarla una práctica insegura.

Ante dichas circunstancias se han efectuado estudios para el aprovechamiento de dos de sus principales plantas de tratamiento, que incluyen entre el posible destino del agua, el paso por filtración en el acuífero del Valle de la Misión y su retorno a la presa Abelardo Rodríguez, para el suministro a la población. Dicha alternativa se conjuga con el suministro de agua en los Valles de Guadalupe y las Palmas, un caudal superior en su conjunto, de 0.97 m³/s que pueden estabilizar acuíferos que igualmente abastecen a la población.

Conclusiones

Para concluir es trascendental considerar lo siguiente:

- Existen casos en que el agua restaurada es la opción más viable para incrementar el suministro a habitantes que crónicamente han carecido de agua en cantidad y/o calidad.
- En general, en las zonas con baja disponibilidad y sobreexplotación se presentan casos que justifican las excepciones para las NOM 127 y NOM 014 para atender situaciones de desabasto y sobreexplotación.
- Es conveniente definir criterios para identificar casos en que el agua restaurada sea de mejor calidad que la suministrada y/o la de los acuíferos.
- La implementación de las modificaciones normativas sugeridas mediante el reconocimiento de casos de excepción no sustituye un plan de mejora

continua de la calidad del agua, con el objetivo de cumplir a plenitud con las condiciones deseables e ideales establecidas por las NOM 127 y NOM 014.

- Los componentes de gestión social y financiera, así como el fortalecimiento de capacidades técnicas, son indispensables para desarrollar el potencial de una economía circular de reúso.

Referencias

- Comisión Estatal del Agua de Baja California. (2015). *Programa Hídrico del Estado de Baja California, Visión 2035*. <http://www.ceabc.gob.mx/documents/peh/2017-06-09-PH-BAJA%20FORO%20TECATE%20v1.pdf>
- Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana. (28 de abril de 2022). *Estudio de alternativas para el aprovechamiento de agua residual tratada de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARS) la Morita y Arturo Herrera Solís, para la CESPT*. https://www.cespt.gob.mx/Documentos/Licitaciones/lic_docs/2022/CA-003-2022_JUNTA%20ACLARACIONES.pdf
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021). NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*, 2 de mayo de 2022. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Gobierno de la CDMX. (2019). *Plan Integral para Acceder al Derecho Humano al Agua en el Valle de México 2019-2030*.
- Gobierno del Estado Aguascalientes. (19 de julio de 2022). *Actualización del Plan Hídrico Estatal 2021-2050 del Estado de Aguascalientes*. <https://eservicios2.aguascalientes.gob.mx/NormatecaAdministrador/archivos/jEDO-23-180.pdf>
- SACMEX. (2021). Plan Maestro de Agua Potable de la Ciudad de México 2021-2030
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2009). NOM-014-CO-NAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. *Diario Oficial de la Federación*, 18 de agosto de 2009. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5105753
- Gobierno de la CDMX. (2019). *Plan Integral para Acceder al Derecho Humano al Agua en el Valle de México 2019-2030*.

16 Evaluación de funcionamiento de redes de agua potable mediante modelación hidráulica e indicadores

Luis Armando Gallegos de Lira

Modelo Integral de Aguas de Aguascalientes

José Manuel Rodríguez Varela

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Las redes de distribución de agua potable (RDAP) son sistemas de infraestructura esenciales de los cuales depende el bienestar y desarrollo de la sociedad. Por tal motivo es fundamental que quienes las operan conozcan su estado de funcionamiento actual para tener mayor capacidad de operación, mantenimiento y mejora de manera efectiva.

En el presente capítulo se expone la aplicación de una metodología que permite evaluar RDAP de forma técnica y cuantitativa, con base en la simulación de funcionamiento de cualquier red de agua potable con un modelo hidráulico de EPANET. Después este es sometido a un algoritmo de cálculo desarrollado con Python que ejecuta múltiples simula-

ciones y brinda un reporte sintetizado con gráficas e indicadores técnicos. Para mostrar su aplicación, se utilizó un sector de distribución de agua ubicado en la ciudad de Aguascalientes.

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de la metodología facilitó la valoración de diversos escenarios y la identificación de obras que se espera ejecutar para mejorar tanto la eficiencia hidráulica como el servicio ofrecido. En este sentido fue posible concluir que las variables hidráulicas generadas mediante un modelo de simulación pueden ser traducidas a indicadores técnicos capaces de evaluar las condiciones actuales de operación de los sistemas de agua, lo cual sirve como soporte para la toma de decisiones.

Palabras clave: redes de agua potable, modelación hidráulica, indicadores técnicos, EPANET, Python.

Introducción

La prestación efectiva de servicios de agua potable es una tarea compleja pero indispensable para el desarrollo de la sociedad. Desde el aspecto técnico-operativo, es necesario asegurar el funcionamiento adecuado de las redes de distribución de agua potable (RDAP), incluso ante factores desfavorables como el crecimiento poblacional, envejecimiento de la infraestructura, estrés hídrico, cambio climático, entre otros. En este sentido, resulta imprescindible contar con herramientas que faciliten la toma de decisiones.

Una de las estrategias más implementadas para dichos fines es la modelación hidráulica de RDAP, técnica de análisis que mediante la digitalización y simulación matemática de todos sus componentes, permite acceder a sus variables hidráulicas de operación para entender su comportamiento.

En ese capítulo se expone la utilización de un procedimiento denominado “metodología para evaluar el funcionamiento de redes de agua potable mediante modelación hidráulica e indicadores” (Gallegos, 2023), que consiste en calcular el nivel de servicio prestado utilizando un modelo de simulación. Para ello se utilizó un sector de distribución de agua operado por el Modelo Integral de Aguas de Aguascalientes (MIAA), organismo operador en esta ciudad capital, con el fin de identificar alternativas de mejora y plantear posteriormente su ejecución.

Metodología utilizada

La metodología empleada consiste en un procedimiento de evaluación técnica de RDAP donde los resultados de una modelación hidráulica (principalmente presiones, demandas y velocidades) son traducidos a indicadores técnicos que permiten revelar las condiciones hidráulicas, la confiabilidad del sistema y la calidad del servicio. Para su implementación, dicha metodología puede dividirse en dos partes: la primera en un proceso manual-cualitativo en el que se obtiene un reporte de evaluación utilizando un modelo hidráulico de Epanet, software desarrollado por la EPA (*Environmental Protection Agency*) de los Estados Unidos. Esto como un ciclo de decisión en el que el modelador puede generar nuevas versiones del modelo con cambios o mejoras

y obtener nuevos reportes que permitan su comparación. La segunda se trata de tres subprocesos de cálculo que son alimentados con las variables hidráulicas de cada modelo, lo que genera automáticamente los reportes mencionados empleando gráficas e indicadores (Fig. 16.1).

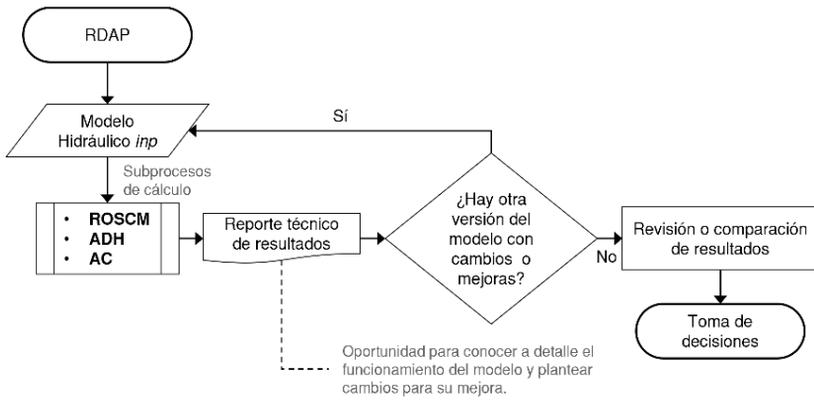


Fig. 16.1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

Como se observa, el ciclo de decisión es prácticamente la utilización de modelación hidráulica apoyada con revisiones automáticas. Los subprocesos son cálculos numéricos que efectúan las revisiones con métricas establecidas, con valores de 0.0 a 1.0 donde en todos los casos este último es el resultado óptimo.

La revisión de opciones de simulación y componentes del modelo (ROSCM), se basa en resumir las principales características del archivo *inp*, como son opciones de simulación utilizadas, cantidad de elementos ingresados y sus propiedades más relevantes. En síntesis, se obtiene un reporte que no brinda Epanet y que es útil para revisar todos los componentes del modelo (nodos, tanques, embalses, tuberías, bombas y válvulas) con sus atributos. Por otro lado, el análisis de desempeño hidráulico (ADH) consiste en ejecutar una simulación dependiente de la presión (Wagner, 1988) siguiendo las condiciones normales o establecidas en el modelo y calcula los indicadores mostrados en la tabla 16.1.

Tabla 16.1. Indicadores del análisis de desempeño hidráulico		
Suministro	Desempeño hidráulico	Cumplimiento
I_{SD}	IDH_p	ICP_{min}
I_{ES}	IDH_{fp}	ICP_{max}
	IDH_v	ICV_{min}
		ICV_{max}

Fuente: elaboración propia, 2025.

El indicador de satisfacción de demanda (I_{SD}), expresa la capacidad del sistema en abastecer las demandas asignadas en los nodos de consumo. El indicador de equidad de suministro (I_{ES}) (Mansoor, 2007), demuestra la equidad con la que se suministra el agua en nodos de demanda. Por su parte, los indicadores de

desempeño hidráulico de presión, de fluctuación de presión y de velocidad, IDH_p , IDH_{fp} e IDH_v , respectivamente, son métricas propuestas por Coelho (1996), que califican las variables hidráulicas de presión y velocidad traduciéndolas en valores de calidad de servicio definidos en la tabla 16.2.

Tabla 16.2. Valor del indicador y su calificación	
Valor del indicador	Calificación
1.00	Óptimo
0.75	Adecuado
0.50	Aceptable
0.25	No aceptable
0.00	No servicio

Fuente: Coelho (1996).

Los indicadores de cumplimiento de presión mínima y máxima, ICP_{min} e ICP_{max} , respectivamente, así como los indicadores de cumplimiento de velocidad, ICV_{min} e ICV_{max} , reflejan el porcentaje de nodos y tuberías que cumplen con parámetros permisibles de presión ($P_{min} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, $P_{max} = 5.0$) y velocidad ($V_{min} = 0.3 \text{ m/s}$, $V_{max} = 4$), lo cuales pueden ser ajustados por el modelador.

El análisis de confiabilidad (AC) ejecuta dos revisiones, una mecánica y una hidráulica, con las cuales se generan escenarios de falla y se obtienen indicadores para conocer la capacidad de la red en operar con estas condiciones. En la primera se ejercen cierres de tuberías; en la segunda se aumenta gradualmente la demanda. No obstante, en este trabajo no se utilizó el AC.

Los procedimientos detallados de la metodología, así como las ecuaciones de cada indicador se encuentran en Gallegos (2023).

Caso de estudio y aplicación práctica

Para la aplicación de la metodología se utilizó el sector de distribución DS05, ubicado en la zona sur-oriente de la ciudad de Aguascalientes, que abarca una superficie de 0.6 km² y abastece a un total de 10 113 habitantes. Este sector opera por gravedad a través de un tanque regulador de mampostería de 5500 m³, alimentado por el pozo P129 con un caudal de 45 lps. Su RDAP consiste en tuberías de PVC que dan un total de 15 km, cuyos diámetros van de 3 a 12 pulgadas.

Para comenzar, se construyó el modelo hidráulico en Epanet y QGIS-Red, este último desarrollado por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia, tomando en cuenta el catastro de redes más actualizado, así como levantamientos de campo para su validación. El periodo de análisis de la simulación fue de 120 horas y la calibración se efectuó hasta conseguir un error relativo del 18%, lo cual fue considerado suficiente.

La primera evaluación se realizó con el modelo en condiciones actuales (escenario 1, véase Fig. 16.2a). Como resultado se identificó una zona alta donde la presión es muy baja, mientras que existen áreas donde por topografía la red alcanza presiones que superan los 3 kg/cm². Por otra parte, un aspecto crítico son las fugas de agua, ya que se estima hasta un 40% de pérdidas respecto al caudal producido. Esto generó la adopción de estrategias emergentes como la regulación de algunas válvulas en líneas secundarias y el tandeo diario de la válvula a la salida del tanque, regulándola en la noche para mantener nivel y abriéndola durante el día, situación que fue simulada con una omisión al cuarto día, reflejando el vaciado rápido del tanque (Fig. 16.3a).

Siguiendo la metodología adoptada, se evaluaron diversas simulaciones y se llegó a la identificación de las siguientes propuestas de mejora.

- **Control de presiones.** Cambio de consigna de válvula reguladora de presión 1 (VRP1) existente a 0.5 kg/cm² constante. Instalación de VRP2 en tubería de 8" con consignas de 1 kg/cm² en el día y 0.8 por la noche.

Instalación de VRP3 sobre en tubería de 10" empleando consignas iguales a la anterior. Asimismo, se propone que todas las válvulas de compuerta reguladas queden totalmente abiertas.

- **Interconexión.** Línea de 135 metros para conectar tuberías de 6". Esta obra garantizaría la regulación de presiones en la zona centro-poniente del sector utilizando la VRP3. Además, se propone una válvula cerrada que evite el flujo de norte a sur en el punto de conexión.
- **Reducción de fugas.** De acuerdo con las simulaciones realizadas, con una reducción de fugas del 12% aproximadamente se podrían mantener los niveles del tanque y permitir caudales continuos en la red.
- **Eliminación de tandeo.** Se propone eliminar totalmente el tandeo realizado en el tanque TQ135.

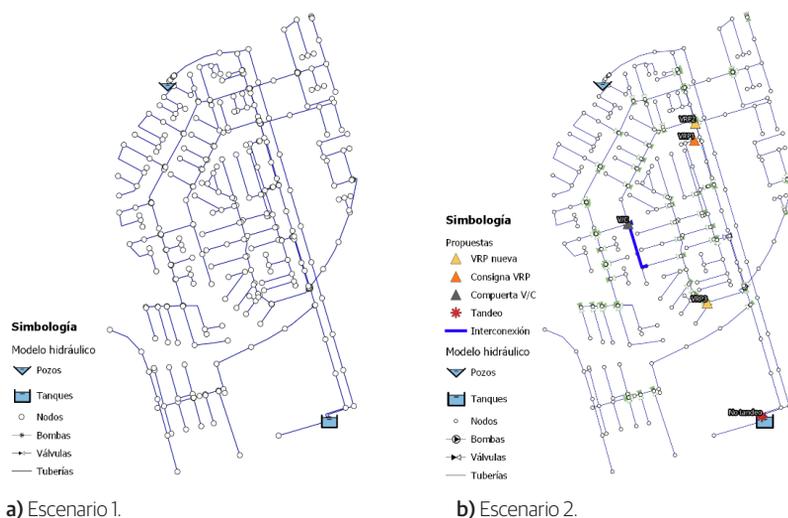


Fig. 16.2. Modelos hidráulicos.

Resultados y discusión

Aplicando las propuestas mencionadas al modelo hidráulico (escenario 2 figura 16.2b), se llevó a cabo una nueva evaluación y se obtuvieron mejores resultados respecto a las condiciones originales. La mejora global se observó

en el comportamiento del tanque ya que sus niveles se mantuvieron estables (Fig. 16.3c), por lo que realizó su función de regulación, distribución de agua las 24 horas y generación de mejor servicio. Lo anterior se logró comprobar de manera cuantitativa mediante la comparación de los indicadores utilizados (Tabla 16.3).

Tabla 16.3. Resultados obtenidos en reportes de evaluación.									
Indicadores	I_{SD}	I_{ES}	IDH_p	IDH_{fp}	IDH_v	ICP_{min}	ICP_{max}	ICV_{min}	ICV_{max}
Escenario 1	0.91	0.90	0.82	0.68	0.53	0.79	1.0	0.19	1.0
Escenario 2	1.0	1.0	0.98	0.99	0.51	1.0	1.0	0.2	1.0

Fuente: elaboración propia, 2025.

Como se observa, la mayor parte de los indicadores del escenario 2 son superiores, lo que demuestra que se logró obtener una distribución de demanda suficiente y equitativa, una regulación de presiones efectiva y el cumplimiento de los valores permisibles impuestos. Cabe destacar que con los indicadores IDH_v e ICV_{min} no se obtuvieron mejoras debido a que, en general, se cuenta con velocidades bajas en ramales secundarios con poca demanda.

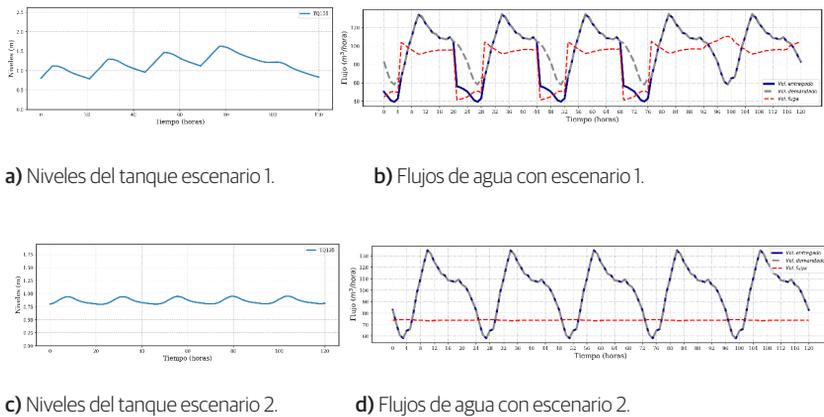


Fig. 16.3. Gráficas de modelo hidráulico original y con acciones de mejora.

En las figuras 16.3b y 16.3d se puede visualizar el contraste entre la distribución de los flujos de agua con ambos escenarios. Es notorio cómo en la segunda se satisface el total de la demanda y se tienen menores pérdidas.

Conclusiones

Se aplicó satisfactoriamente la metodología a un sector real de abastecimiento de agua, con lo cual se logró la identificación de acciones para mejorar la capacidad hidráulica del sistema y en consecuencia su nivel de servicio. Lo anterior fue comprobado de manera cuantitativa mediante los resultados obtenidos en la evaluación de escenarios, empleando modelación hidráulica e indicadores.

Los indicadores técnicos facilitan la interpretación de las variables hidráulicas de un modelo, traduciéndolas en valoraciones de servicio que no solo sirven para conocer a detalle su funcionamiento, sino que ayudan en el planteamiento de soluciones para atender problemáticas a medida en sistemas de agua. Finalmente, se reconoce la metodología utilizada como un procedimiento útil y efectivo para la toma de decisiones en la operación y gestión de RDAP.

Referencias

- Coelho, S. T. (1996). *Performance assessment in water supply and distribution*. PhD, Herriot-Watt University.
- Gallegos, L. A. (2023). *Metodología para evaluar el funcionamiento de redes de agua potable mediante modelación hidráulica e indicadores*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Mansoor, M. (2007). *Performance Assesment of Water Distribution Systems*. PhD, University of Loughborough, UK.
- Wagner, J. M., Shamir, U., y Marks, D. H. (1988). Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), pp. 276–294.

17 Fiabilidad y exactitud del balance de agua potable

Leonel Humberto Ochoa Alejo
Ingeniero autónomo

Resumen

El balance de agua potable es una técnica de examinación sistemática de registros estadísticos, mediciones y datos sobre volúmenes de agua, desde el punto de ingreso al sistema de abastecimiento, a través de la red de distribución y hasta la entrega a los consumidores por las tomas domiciliarias. Los resultados indican el volumen de agua suministrado, el consumo de los usuarios y los niveles de pérdidas reales (fugas) y aparentes (errores en medición, usos irregulares). La confiabilidad de los resultados del balance de agua potable depende de la certidumbre y exactitud de los datos de los volúmenes utilizados en el cálculo. A la fecha, existen algunos reportes de métodos que valoran esta confiabilidad, como el de la American Water Works Association, AWWA, que calcula un punta-

je en función de la calidad de datos, o el de la International Water Association, IWA, que asocia una banda de confianza del 95% a la exactitud de los registros.

En este capítulo se presenta un método combinado de los dos anteriores, con una matriz de puntajes de certidumbre y bandas de exactitud con valores asignados en función de la experiencia práctica en el desarrollo de balances de agua potable de ciudades mexicanas. Se utilizan los teoremas de variancia estadística y desviación estándar en la determinación de la propagación de la certidumbre en el cálculo y resultado final del balance de agua potable, para valorar en consecuencia los errores del volumen de agua que ocurren en cada punto del sistema de abastecimiento de este recurso.

Palabras clave: balance de agua potable, mediciones y datos sobre volúmenes de agua, confiabilidad, pérdidas de agua, matriz de puntajes de certidumbre.

Introducción

En un sistema hidráulico de abastecimiento de agua potable, el agua suministrada a la red de conducciones, tuberías y tomas domiciliarias debería ser igual al agua consumida por los usuarios domésticos y no domésticos de la población, sin embargo, esto no sucede así porque siempre es mayor. Esto se debe a dos razones. Por un lado, la infraestructura del sistema tiene fallas físicas y operacionales que provocan pérdidas reales o fugas; por otro, los equipos de medición del volumen de agua son inexactos porque en ciertos puntos de suministro o en varias tomas de usuarios no existen medidores, hay algunos usuarios conectados ilegalmente a la red o que cometen fraudes, así como errores en el manejo de información y datos que ocasionan pérdidas aparentes.

Existen diferentes técnicas para llevar a cabo la evaluación de las pérdidas de agua. La del balance de agua potable con los estándares de la International Water Association, IWA, nombrada también balance hídrico o auditoría de agua, es la que ofrece resultados globales y confiables para todo el sistema. Este balance de agua potable se compone de entradas de datos individuales y de valores derivados o calculados. Si los datos ingresados en el balance de agua son inexactos, los resultados derivados del balance de agua también lo serán. Como resultado, la simple realización de un balance de agua potable no garantiza su certeza.

A continuación se presenta un método para evaluar la confiabilidad del balance de agua potable, utilizando los fundamentos teóricos reportados y la experiencia del autor en la aplicación de ciudades mexicanas.

Fundamentos y antecedentes técnicos

La confiabilidad de los resultados del balance de agua potable depende de la certidumbre y exactitud de los datos de los volúmenes utilizados en el cálculo.

Certidumbre de datos. Se refiere a la calidad de la fuente de los datos, es decir, con qué certeza proporciona información consistente, estable y uniforme, para repeticiones a lo largo del tiempo. Por ejemplo, la certidumbre de los datos será mayor si provienen de un medidor fijo, calibrado y automatizado que de registros de medidores portátiles temporales, o de extrapolaciones derivadas de otras mediciones similares.

Exactitud de datos. Es el grado de aproximación que tienen esos datos a su valor verdadero, está asociada con la precisión y dispersión. Por ejemplo, un dato que se obtiene con un medidor estándar calibrado tendrá mayor exactitud y precisión que aquel que provenga de algún medidor deteriorado, o que sea derivado de un muestreo poco representativo.

En referencias internacionales, la calidad de los datos de los balances de agua potable se ha expresado mediante una variedad de técnicas, desde métodos estadísticos que incorporan intervalos de confianza hasta sistemas cualitativos que utilizan escalas alfanuméricas. A la fecha existen reportes de métodos que valoran esta confiabilidad, como el de la American Water Works Association, AWWA (Andrews et al., 2016), que calcula un puntaje en función de la calidad de datos, o el de la International Water Association, IWA (Alegre, et al., 2020), que asocia una banda de confianza del 95% con la exactitud de los registros.

Para determinar la propagación de la exactitud en los datos derivados en el balance de agua potable, o sea en aquellos valores que son calculados a partir de datos de mediciones o estimaciones, la IWA recomienda utilizar la varianza ($V = \sigma^2$) de cada componente del balance de agua potable, sobre la misma base de límites de confianza de 95%. Por consiguiente, se aplican las definiciones y teoremas de la desviación estándar y la variancia estadística descritas por Spiegel (1982).

La desviación estándar, σ , normalizada de cada componente del balance de agua potable se calcula con la ecuación siguiente:

$$\sigma = \frac{X - \mu}{Z} \quad (1)$$

Donde:

X = variable aleatoria normalmente distribuida.

μ = valor medio de la variable X .

Z = valor de la abscisa de la curva de probabilidad normalizada.

El valor de $X - \mu$ se interpreta como un volumen componente del balance de agua potable, multiplicado por su banda de exactitud (+/-), o sea, la ecuación de la desviación estándar para el balance hídrico, con un nivel de confianza del 95%, como la que propone Galindo (2014):

$$\sigma = \frac{|V|*BE}{Z} = \frac{|V|*BE}{1.96} \quad (2)$$

Siendo el volumen componente del balance de agua potable en valor absoluto y BE la banda de exactitud asignada o derivada; el valor de 1.96 es la abscisa de la curva de probabilidad normalizada, correspondiente al nivel de confianza del 95%.

Los teoremas de la varianza utilizados en el balance de agua potable son los siguientes:

$$V(cX) = c^2*V(X) \quad c \text{ es una constante.} \quad (3)$$

$$V(X + Y) = V(X - Y) = V(X) + V(Y) \quad Y \text{ es otra variable aleatoria.} \quad (4)$$

Método para evaluar la fiabilidad del balance de agua potable

En el método presentado aquí se realiza una aplicación combinada de los métodos de AWWA e IWA en la estimación de la confiabilidad del balance de agua potable. Se propone una matriz con puntajes de certidumbre de 6 a 10, asociadas con bandas de exactitud de +/- 2% hasta +/- 20%, con un nivel de confianza del 95%. En la tabla 17.1 se muestra un extracto de la matriz. Estos valores no han sido confirmados experimental ni estadísticamente, pero tienen un criterio lógico y acorde con resultados técnicos demostrados en la operación de los sistemas de agua potable existentes.

En el desarrollo del balance de agua potable se eligen de esta matriz los puntajes de certidumbre y bandas de exactitud (95% de confianza), para cada uno de los datos de volumen de agua que ingresan al balance de agua. En seguida se calculan los puntajes de certidumbre y bandas de exactitud de aquellos componentes derivados en el balance de agua potable. Con los puntajes de certidumbre y las bandas de exactitud ingresadas y derivadas, se calculan los errores volumétricos para cada componente, y el puntaje de certidumbre global o parcial del balance de agua potable.

Tabla 17.1. Extracto de la matriz de puntajes de certidumbre y bandas de exactitud 95% de confianza para ingreso de datos al balance de agua potable.		
Banda Exactitud	Puntaje Certidumbre	Origen de la información
Agua de captaciones con macromedidor		
+/-0%	0	No aplica este concepto al sistema de agua potable
+/-10%	6	Registros de lectura periódica y captura manual en macromedidor instalado, hasta el 50% del periodo y 50% extrapolados.
+/-8%	7	Registros de lectura continua de telemetría en macromedidor instalado, hasta el 50% del periodo y 50% extrapolados.
+/-6%	8	Registros de lectura periódica y captura manual en macromedidor instalado en el 100% del periodo.
+/-4%	9	Registros de lectura continua de telemetría en macromedidor instalado, hasta 50% del periodo y 50% con lectura periódica manual.
+/-2%	10	Registros de lectura continua de telemetría en macromedidor instalado en el 100% del periodo.
Agua de captaciones sin macromedidor		
+/-0%	0	No aplica este concepto al sistema de agua potable.
+/-20%	6	Estimado indirectamente con caudal de especificaciones técnicas y horas de operación con datos de bitácoras.
+/-15%	7	Estimado indirectamente con medición temporal de caudal, equipo portátil y horas de operación con datos de bitácoras.
+/-10%	8	Estimado indirectamente con dos mediciones temporales de caudal, equipo portátil y horas de operación con bitácoras.
+/-8%	9	Estimado indirectamente con dos mediciones temporales de caudal, equipo fijo y horas de operación con datos de bitácoras.
+/-6%	10	Estimado indirectamente con dos mediciones temporales de caudal, equipo fijo y midiendo horas de operación.
Agua de consumos medidos		
+/-0%	0	No aplica este concepto al sistema de agua potable.
+/-10%	6	Registros de facturación, lectura periódica manual, hasta 50% de micromedidores bien medidos y 50% extrapolados.
+/-8%	7	Registros de facturación, lectura automática, hasta 50% de micromedidores bien medidos y 50% extrapolados.
+/-6%	8	Registros de facturación, lectura periódica manual, 100% de micromedidores bien medidos y sin registros mal medidos.
+/-4%	9	Registros de facturación, hasta 50% lectura manual de micromedidores, 50% lectura automática.
+/-2%	10	Registros de facturación, 100% lectura de micromedidores automática.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Ecuaciones para el cálculo del puntaje de certidumbre parcial o global del balance de agua potable

Las ecuaciones que aplican para cálculo de los puntajes de certidumbre parciales del agua de suministro y del consumo, son las siguientes:

$$P_{Suministro} = \sum_{i=1}^n \frac{(V_i \times P_i)}{V_S} \quad (5)$$

$$PC_{Suministro} = \frac{P_{Suministro} - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \times 100 \quad (6)$$

$$P_{Consumos} = \sum_{j=1}^n \frac{(C_j \times P_j)}{V_C} \quad (7)$$

$$PC_{Consumos} = \frac{P_{Consumo} - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

$P_{Suministro}$ = puntaje de los datos del agua del suministro

V_i = volumen de agua del componente i del agua del suministro

P_i = puntaje de la matriz de certidumbre del componente i del agua del suministro

i = componente del agua de suministro

n = número de componentes del agua de suministro

V_S = volumen total del agua del suministro

$PC_{Suministro}$ = puntaje de certidumbre de agua de suministro, en %

P_{min} = mínimo puntaje indicado en la matriz

$P_{máx}$ = máximo puntaje indicado en la matriz

$P_{consumos}$ = puntaje de los datos del agua del consumo y pérdidas identificadas

C_j = volumen de agua del componente j del agua del consumo

P_j = puntaje de la matriz de certidumbre del componente j del agua del consumo y pérdidas identificadas

j = componente del agua del consumo y pérdidas identificadas

m = número de componentes del agua del consumo

V_C = volumen total del agua del consumo y pérdidas identificadas
 $PC_{Consumos}$ = puntaje de certidumbre de agua del consumo y pérdidas identificadas, en %

El puntaje global de certidumbre del balance de agua potable, en porcentaje, se calcula con el promedio ponderado de los puntajes parciales del agua de suministro y de los consumos, con la siguiente ecuación:

$$PB_{Certidumbre} = \left[\frac{V_S}{V_S + V_C} \cdot PC_{Suministro} + \frac{V_C}{V_S + V_C} \cdot PC_{Consumos} \right] \times 100 \quad (9)$$

Los puntajes de certidumbre global o parcial son indicadores de la confiabilidad derivados de los datos que ingresan en el balance de agua potable. Mientras más cercano resulte el puntaje a 100%, los datos tendrán una mejor confiabilidad y por ende el balance tendrá mayor confiabilidad.

Ecuaciones para el cálculo de la banda de exactitud y error volumétrico de los componentes del balance de agua potable

El cálculo de las bandas de exactitud de las componentes derivadas del balance de agua se basa en la ecuación 2 de la desviación estándar para el balance hídrico y los teoremas de la variancia estadística de las ecuaciones 3 y 4. Por consiguiente, el primer paso es calcular todas las desviaciones estándar y varianzas de los volúmenes componentes que ingresan al balance de agua, utilizando la ecuación siguiente:

$$\sigma_k = \frac{V \times BE_k}{Z} \quad (10)$$

Donde k representa cada componente de ingreso del balance de agua potable, σ , V y BE son la desviación estándar, el volumen de agua y banda de exactitud elegida de la matriz, respectivamente, y Z tiene un valor de 1.96 para el nivel de confianza del 95%. La varianza es igual al cuadrado de la desviación estándar.

En seguida se determinan las bandas de exactitud de todos los componentes derivados del balance de agua potable, aplicando los teoremas de la

varianza y la ecuación 11 como son: suma del agua de captaciones con macromedidor, total del consumo autorizado facturado, suma del consumo autorizado no facturado, total del consumo autorizado, pérdidas potenciales aparentes y reales.

$$BE_{kd} = \frac{\sigma_{kd} \times Z}{V_{kd}} \quad (11)$$

Donde:

BE_{kd} = banda de exactitud de la componente k , derivada del balance de agua potable

σ_{kd} = desviación estándar

V_{kd} = volumen de agua derivado en el balance de agua potable

Finalmente, se calcula el error volumétrico dividiendo la desviación estándar de cada componente del balance de agua potable entre su volumen de agua, respectivo. Los resultados de errores volumétricos de cada componente del balance de agua potable quieren decir que los volúmenes obtenidos en dicho balance pueden variar en más o menos el porcentaje indicado, con un nivel de confianza del 95%.

Aplicación del método de confiabilidad del balance de agua potable.

En años recientes se desarrolló el software Hydro® (2023) para realizar el cálculo y análisis del balance de agua potable. Esta herramienta Hydro® cuantifica, ajusta y estima los diferentes volúmenes de agua descritos antes. Está desarrollada para Windows 10 o superior, de 64 bits y requiere Excel y una RAM de 6 GB o superior. Puede administrar más de un proyecto a la vez en la misma computadora y diferentes usuarios pueden accederlos y editarlos simultáneamente, además de emitir reportes PDF.

Una de las utilidades importantes que contiene el programa es la valoración de la confiabilidad del balance de agua potable, utilizando el método expuesto. El software Hydro® se ha aplicado en los sistemas de agua potable de las ciudades mexicanas de Irapuato, Guanajuato, en el periodo de abril de 2021 a marzo de 2022 y Puebla, Puebla, de enero a diciembre de 2023, donde se obtuvieron volúmenes de pérdidas del 42.6% y 23.0% respecto del volumen suministrado, con errores volumétricos de +/- 1.84% y +/- 3.09 %,

respectivamente; el puntaje de certidumbre global para Irapuato fue 67.9% y para Puebla de 72.4%.

Conclusiones

Los balances de agua potable que se realicen en los sistemas de abastecimiento de localidades deben indicar su nivel de confiabilidad, que dependerá de la calidad del origen de los datos y de la exactitud con la que fueron obtenidos, para que se tenga conocimiento de la certidumbre y el error volumétrico que lleva implícito y las empresas operadoras dispongan de mejores elementos en las acciones que emprendan.

El método presentado en este escrito es un procedimiento semiempírico para determinar el nivel de confiabilidad del balance de agua potable es consistente estadísticamente y se basa en la experiencia mexicana de muchos organismos operadores.

Los resultados del balance de agua potable en Irapuato y Puebla muestran que los puntajes de incertidumbre aún pueden mejorar, al implementar la medición automatizada y generar estadísticas operacionales y de mantenimiento oportunas. De la misma forma, los errores volumétricos calculados para el valor de pérdidas de agua muestran un rango de aproximación menor al 5%, lo que implica una confiabilidad aceptable para definir acciones de reducción de fugas y errores de contabilidad del agua.

Referencias

- Alegre H., et al., (2020), Indicadores de desempeño para servicios de abastecimiento de agua, Edición © 2020, *IWA Publishing*, ISBN: 978-84-9048-985-7 (versión electrónica).
- Andrews L., Gasner K., Sturm R., Kunkel G., Jernigan W. y Cavanaugh S. (2016). *Water Audit Validation: Guidance Manual*. Water Research Foundation.
- Galindo S. D.C., (2014). Herramientas para el estudio de la incertidumbre asociada a la estimación del Balance Hídrico en el Sistema de Acueducto de la ciudad de Bogotá, Tesis de investigación, Universidad Nacional de Colombia.
- Ochoa A.L., Reyes M. L. y Pereda. P. E., (2023). Hydro. Herramienta para la gestión del balance hídrico en México, Actas del XVII Congreso Iberoamericano de sistemas de abastecimiento, saneamiento y riego, Serea 23, España, pp. 180.
- Spiegel, M. R. (1982). *Probabilidad y Estadística*. McGraw-Hill.

18 Suministro intermitente de agua potable, un reto en Latinoamérica

Jesús Rubén Sánchez Navarro

David Humberto Sánchez

Eduardo Hernández Samaniego

Miguel Alberto Peña Balderas

Carmen Julia Navarro Gómez

Universidad Autónoma de Chihuahua

Eduardo Herrera Peraza

Centro de Investigación de Materiales

Avanzados

Humberto Iván Navarro

Universidad Autónoma

del Estado de Hidalgo

Resumen

En este capítulo se presenta un análisis que demuestra que el suministro intermitente de agua no es solo una cuestión de gestión o de factores externos, sino un desafío técnico y operativo que requiere un entendimiento integral del problema, por lo cual es fundamental vincular las decisiones del operario técnico con la satisfacción de la demanda del usuario, con base en indicadores cuantificables y medibles.

El estudio se fundamenta en una metodología desarrollada en Chihuahua, México, que, si bien emplea herramientas como la gestión de presiones y la sectorización de redes, reconoce

que estas por sí solas no garantizan la calidad del servicio. La clave para transformar esta práctica radica en la implementación de indicadores operativos precisos que permitan evaluar y mejorar la eficiencia del suministro. Solo a través de una medición rigurosa y una gestión basada en datos es posible establecer bases sólidas para un servicio sostenible y equitativo para los usuarios. Así, la gestión de presiones y la sectorización de redes permiten una reducción significativa en las pérdidas de agua, una mejora en la eficiencia operativa y un aumento en la satisfacción de los usuarios.

Palabras clave: suministro intermitente de agua potable, gestión de presiones, eficiencia operativa del servicio de agua.

Introducción: generar conocimiento para entender el IWS

En este capítulo se presenta un análisis que demuestra que el suministro intermitente de agua (IWS, por sus siglas en inglés), no es solo una cuestión de gestión o de factores externos, sino un desafío técnico y operativo que requiere un entendimiento integral del problema porque es fundamental vincular las decisiones del operario técnico con la satisfacción de la demanda del usuario, con base en indicadores cuantificables y medibles.

El presente análisis se fundamenta en un estudio en el que se aplicó una metodología desarrollada en Chihuahua, México (Sánchez, et al., 2020) que, si bien emplea herramientas como la gestión de presiones y la sectorización de redes, reconoce que estas por sí solas no garantizan la calidad del servicio. La clave para transformar esta práctica radica en la implementación de indicadores operativos precisos que permitan evaluar y mejorar la eficiencia del suministro. Solo a través de una medición rigurosa y una gestión basada en datos es posible establecer bases sólidas para un servicio sostenible y equitativo para los usuarios (Ilaya-Ayza, et al., 2015).

Para abordar esta problemática se emplearon herramientas de análisis hidráulico para definir los puntos críticos del sistema e implementar sistemas de control remoto para monitoreo en tiempo real. Además, se evaluaron los impactos del cambio de suministro intermitente a continuo considerando los costos económicos, ambientales y sociales (Sánchez, et al., 2020).

Suministro intermitente: práctica extendida, reflexión limitada

El suministro intermitente de agua potable es una problemática que afecta a numerosas ciudades en América Latina, situación que compromete la calidad de vida de millones de personas y agrava la crisis hídrica en la región (OECD, 2012 y BID, 2015). Aunque este fenómeno suele atribuirse a deficiencias en la gestión operativa de los organismos operadores, diversos estudios han demostrado que sus causas son estructurales y multifactoriales. Estas incluyen deficiencias en la infraestructura, ineficiencias en la operación de los sistemas de distribución y la normalización del problema tanto por parte de los operadores como de los usuarios (Garzón y Sturzenegger, 2017; Kumpel y Nelson, 2016). Además, las estrategias centradas únicamente en

aumentar la oferta de agua sin abordar los problemas de distribución han resultado contraproducentes porque incrementan las pérdidas y sobrecargan las redes de suministro (World Bank, 2017, Van den Berg, 2014).

El fenómeno del suministro intermitente en América Latina cada vez es más frecuente, sin importar el tipo de fuente de abasto. En la tabla 18.1 se presenta un listado de las principales ciudades de la región en las que el suministro de agua potable es intermitente y su fuente de abasto.

Tabla 18.1. Ciudades de Latinoamérica que tienen sistemas de suministro intermitente de agua potable (IWS) y tipo de fuente de abasto de agua.		
Ciudad	País	Tipo de fuente de abasto de agua
Ciudad de México	México	Subterránea y superficial
Lima	Perú	Superficial
La Paz	Bolivia	Superficial
Quito	Ecuador	Superficial
Guayaquil	Ecuador	Superficial
Cuenca	Ecuador	Superficial
Ambato	Ecuador	Superficial
Santo Domingo	República Dominicana	Superficial
Tegucigalpa	Honduras	Superficial
San Salvador	El Salvador	Superficial
Asunción	Paraguay	Superficial
Ciudad de Guatemala	Guatemala	Superficial
Caracas	Venezuela	Superficial
Bogotá	Colombia	Superficial
San José	Costa Rica	Superficial
Panamá	Panamá	Superficial
Buenos Aires	Argentina	Superficial
Santiago	Chile	Superficial
Sao Paulo	Brasil	Superficial
Salvador	Brasil	Superficial

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En países como Perú, Bolivia, Honduras y México, la intermitencia es especialmente grave. En zonas urbanas de alta densidad poblacional, como Ciudad de México y Lima, los cortes de agua pueden durar horas o incluso días. En áreas rurales, el problema es aún más crítico, con comunidades que reciben agua solo unas pocas veces por semana (Organización Panamericana de la Salud, OPS, 2021).

En particular, en México, la inseguridad hídrica, medida a través de la escala de experiencias de inseguridad del agua en el hogar (HWISE), muestra que 16.5% de los hogares la experimenta, con variaciones significativas entre regiones. Por ejemplo, la región frontera (Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas) registró un aumento del 18.9% en la inseguridad hídrica entre 2021 y 2022, mientras que la región península (Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán) experimentó una disminución del 7% en el mismo periodo (Muñoz-Espinosa et al., 2023). Estas diferencias regionales pueden atribuirse a factores climáticos como el fenómeno de La Niña, que causó sequías severas en el norte del país y un aumento en las lluvias en el sur. (Muñoz-Espinosa et al., 2023)

Parte de la intermitencia del suministro es también operativo. Muchos sistemas de distribución de agua en América Latina son obsoletos o insuficientes para satisfacer la demanda creciente. La pérdida de agua por fugas en las redes de distribución es un problema grave. En países como Colombia y Argentina se estima que hasta 40% del agua potable se pierde antes de llegar a los hogares. (BID, 2021).

Impactos en la salud, social y económico del IWS

La intermitencia del servicio tiene un impacto significativo en la salud pública. Según la OMS (2020), 14% de la población en América Latina consume agua que no cumple con los estándares de calidad, lo que aumenta el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua.

El suministro intermitente repercute directamente en la salud pública porque incrementa el riesgo de contaminación microbiológica, lo cual compromete la calidad del agua que llega a los hogares (Wunderlich et al, 2021). Diversas investigaciones han demostrado que esta situación puede derivar en un aumento en la incidencia de enfermedades diarreicas, en especial, en poblaciones vulnerables como niños menores de cinco años (Nazate, et al,

2024). Este problema es particularmente grave en comunidades de bajos ingresos, donde las estrategias de almacenamiento doméstico posiblemente no cumplen con las condiciones sanitarias adecuadas (Lombana et al, 2021).

Además, la intermitencia del servicio acentúa las desigualdades sociales y económicas. Mientras que las zonas urbanas de alto nivel socioeconómico suelen tener un acceso más estable, las comunidades rurales y marginadas enfrentan un servicio limitado y de baja calidad. En México, por ejemplo, solo 30% de los hogares rurales tiene acceso continuo al agua, en comparación con 70% en zonas urbanas (INEGI, 2020). Así, la falta de acceso continuo al agua afecta desproporcionadamente a las comunidades más vulnerables, lo que perpetúa ciclos de pobreza y exclusión social.

Desde una perspectiva económica, la intermitencia del servicio también representa una carga financiera para los hogares. Muchas familias deben invertir en sistemas de almacenamiento, bombas de agua y, en algunos casos, la compra de agua embotellada, lo que incrementa sus gastos mensuales. (BID, 2021).

Gestión del IWS con enfoque de equidad y sostenibilidad de servicio

En América Latina se han logrado avances significativos en la cobertura y ampliación de la infraestructura de agua potable en las últimas décadas; sin embargo, la intermitencia en el suministro se ha convertido en un problema creciente que afecta a millones de personas en la región. Como ya se explicó, aunque el acceso al agua potable ha aumentado, la falta de un servicio continuo y confiable genera graves consecuencias sociales, económicas y de salud pública.

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, la región ha alcanzado una cobertura promedio del 85% en zonas urbanas y del 65% en zonas rurales. Países como Chile, Uruguay y Costa Rica tienen coberturas cercanas al 95%, lo que refleja avances notables en infraestructura hídrica. No obstante, estos logros contrastan con la creciente intermitencia en el suministro, que afecta al 40% de los hogares en la región (CEPAL, 2022).

La falta de un servicio continuo obliga a los usuarios a recurrir al almacenamiento doméstico, una práctica que, aunque necesaria, puede comprometer la calidad del agua. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020),

el almacenamiento inadecuado es una de las principales causas de contaminación del agua lo que aumenta el riesgo de enfermedades como diarreas, cólera y hepatitis. En América Latina se estima que el 50% de los hogares almacena agua en tanques, cisternas o recipientes improvisados, lo que agrava el problema (OPS, 2021).

Así, otro desafío crítico es la ausencia de una definición clara sobre la capacidad de almacenamiento. Esto se evidencia en datos de encuestas como los que aporta la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental en México, donde se reporta que muchos hogares no cuentan con sistemas de almacenamiento adecuados (INEGI, 2020). Esta falta de capacidad no solo afecta la calidad del agua, sino que también limita la eficiencia en la distribución y aumenta los costos operativos para los proveedores de servicios.

En la figura 18. 1 se presenta una clasificación que tiene como premisa cómo es ese comportamiento (presión) en el punto de entrega al usuario.

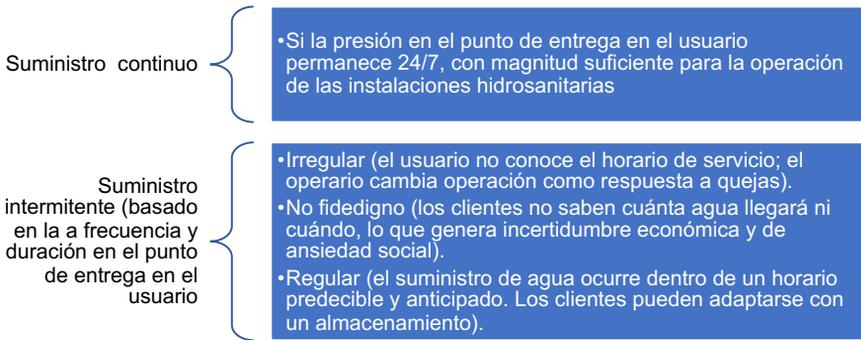


Fig. 18.1. Clasificación del suministro de servicio en un sistema de distribución de agua potable basado en la presión de entrega al usuario, al considerar la magnitud y permanencia de la presión.

Por tanto, el suministro intermitente de agua no puede gestionarse solo con base en la cantidad de agua entregada, sino debe considerarse la calidad del servicio, determinada por presión, permanencia y equidad en la distribución.

Propuesta operativa basada en la satisfacción de la demanda del usuario

Una propuesta operativa clave para abordar la intermitencia del suministro debe entonces basarse en la satisfacción de la demanda del usuario al

considerar tres aspectos fundamentales: magnitud, frecuencia y permanencia de la presión en el punto de entrega.

- **Magnitud.** La presión del agua en el punto de entrega debe ser suficiente para satisfacer las necesidades de los usuarios. Esta magnitud debe ajustarse según las características topológicas del sector, ya que áreas con desniveles pronunciados requieren mayores presiones para garantizar el suministro en zonas elevadas.
- **Frecuencia.** Debe establecerse de acuerdo con los patrones hidráulicos de flujo para alcanzar las magnitudes determinadas.
- **Permanencia.** La presión debe mantenerse estable durante el horario de servicio establecido.

Esta propuesta no solo mejora la calidad del servicio, sino que también reduce las desigualdades en el acceso al agua, en especial, en comunidades vulnerables donde la intermitencia es más frecuente.

Conclusiones

El suministro intermitente de agua potable en América Latina es un desafío que exige una gestión basada en datos, infraestructura moderna y colaboración entre sectores. Su impacto va más allá de la disponibilidad del recurso pues afecta la calidad de vida, la salud pública y el desarrollo socioeconómico.

Para garantizar un acceso equitativo y sostenible es clave optimizar la gestión operativa, incorporar tecnologías innovadoras y fortalecer la cooperación entre organismos públicos, privados y la academia.

La gestión de presiones y la sectorización de redes permiten una reducción significativa en las pérdidas de agua, una mejora en la eficiencia operativa y un aumento en la satisfacción de los usuarios.

Un enfoque basado en la demanda del usuario, considerando presión y frecuencia del servicio, puede mejorar la equidad en el acceso al agua. Los hallazgos demuestran que, con una estrategia adecuada, es posible superar las barreras estructurales y operativas que perpetúan el suministro intermitente de agua potable en la región (INEGI, 2020 e IMTA, 2020).

Enfrentar este reto requiere innovación, coordinación y políticas públicas inclusivas que convertirán el acceso al agua en un derecho efectivo para todos.

Referencias

- Banco Interamericano de Desarrollo. (2015). *Agua y saneamiento en América Latina y el Caribe: Diagnóstico, desafíos y políticas*.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). *Agua y saneamiento en América Latina: Desafíos y oportunidades*. <https://www.iadb.org>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). Estadísticas e indicadores de agua potable en América Latina. Recuperado de <https://www.cepal.org>
- Garzón, C. y Sturzenegger, G. (2016). *Los desafíos de la agenda de desarrollo post-2015 para el sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe: Conclusiones de la Semana Mundial del Agua 2015*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Los-desaf%C3%ADos-de-la-agenda-de-desarrollo-post-2015-para-el-sector-de-agua-y-saneamiento-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-Conclusiones-de-la-Semana-Mundial-del-Agua-2015.pdf>
- Ilaya-Ayza, A. E., Campbell, E., Pérez García, R. e Izquierdo J. (9 de diciembre 2015). La problemática de los sistemas de suministro de agua intermitentes. Aspectos generales. *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, RIOCI. 5, 33-41. <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/article/view/1990/1780>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (17 de abril 2020). Sectorización de las redes de agua potable y mejora del servicio de agua potable a los hogares. <https://www.gob.mx/imta/articulos/sectorizacion-de-las-redes-de-agua-potable-y-mejora-del-servicio-de-agua-potable-a-los-hogares>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) 2020.
- Kumpel, E., y Nelson, K. (2016). Intermittent water supply: Prevalence, practices, and impacts on water quality and health. *Environmental Science & Technology*, 50(2), 542-553.
- Lombana Cordoba, C., Saltiel, G. Sadik, N., Perez Penalosa, F. (2021). *Utility of the Future : Taking Water and Sanitation Utilities Beyond the Next Level (vol. 1 y 2) (Spanish)*. World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/35309>
- Muñoz-Espinosa, A., Rodríguez, M. y Hernández, C. (2023). *Evaluación de la inseguridad hídrica en México utilizando la Escala HWISEN*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nazate Chuga, Z. R., Abata Erazo, A. P. y Alvarado Paguay, J. D. (2024). *Risk factors for acute diarrheal diseases in children under five years of age in El Chical parish, Ecuador*. Salud, Ciencia y Tecnología-Serie de Conferencias, 3(112).

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. (2012). *Gobernanza del agua en América Latina y el Caribe: un enfoque multinivel*. Estudios de la OCDE sobre el agua, OECD Publishing.
- Organización Mundial de la Salud. (2020). *Directrices para la calidad del agua potable*. <https://www.who.int>
- Organización Panamericana de la Salud. (2021). *Informe sobre el acceso al agua potable en América Latina*. <https://www.paho.org>
- Sánchez, J. R., Sánchez, D. H., Navarro, C. J., Mendoza, C., Carrillo, L., y Altes, M. (2021). Gestión de presión en redes sectorizadas de agua potable, ¿una alternativa para el suministro intermitente? *Tlálac*, 73, pp. 19-25. Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Van den Berg, C. (2014). The Drivers of Non-Revenue Water: How Effective are Non-Revenue Water Reduction Programs? *Policy Research Working Paper*, 6997. World Bank Group, Washingt. <http://hdl.handle.net/10986/19396>
- World Bank. (2017). *Reducing water losses in distribution networks: Best practices and lessons learned*. World Bank Group.
- Wunderlich S, Saint George Freeman S., Galindo L., Brown C., Kumpel E. (15 de junio 2021). Optimizing Household Water Decisions for Managing Intermittent Water Supply in Mexico City. *Environmental Science Technology*. 55(12), pp. 8371-8381.

19 Agua regenerada: retos, oportunidades y viabilidad en el contexto de la potabilización

Carmen Julia Navarro Gómez

Mario Alberto Olmos Márquez

Jesús Rubén Sánchez Navarro

Universidad Autónoma de Chihuahua

Resumen

El agua regenerada, es decir, aquella obtenida mediante el tratamiento avanzado de aguas residuales, se destaca como una solución ante la escasez hídrica, agravada por el cambio climático y el crecimiento urbano poblacional. Proyectos como el programa NEWater, en Singapur y el de recarga de acuíferos en Orange County, California muestran que es posible adoptar esta alternativa. Sin embargo, su adopción para consumo humano enfrenta barreras normativas, técnicas y socioculturales.

En México, la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021 no permite la reutilización directa de aguas

residuales tratadas, lo que refleja un vacío legal que obstaculiza proyectos piloto que podrían ofrecer soluciones en urbes como Monterrey o la Ciudad de México, donde la demanda supera la oferta.

En el siguiente capítulo se presentan los principales conceptos clave acerca del agua regenerada, y aquellos que podrían aplicarse para México. Adoptar estas lecciones en nuestro país, implicaría no solo modernizar infraestructuras sino también abarcar el aspecto social que conlleva reconstruir la confianza ciudadana, históricamente marcada por la inequidad en el acceso al recurso hídrico.

Palabras clave: agua regenerada, tratamiento avanzado de aguas residuales, escasez hídrica.

Introducción

El agua regenerada, obtenida mediante el tratamiento avanzado de aguas residuales, se destaca como una solución crítica ante la escasez hídrica global, agravada por el cambio climático y el crecimiento urbano descontrolado (Jiménez-Cisneros, 2018). En México, donde el 60% del territorio enfrenta estrés hídrico (Conagua, 2020), esta alternativa es urgente; sin embargo, su adopción para consumo humano tropieza con barreras normativas, técnicas y socioculturales. En cuanto al primer aspecto, la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021) no permite la reutilización directa de aguas residuales tratadas, lo que refleja un vacío legal que obstaculiza proyectos piloto en ciudades como Monterrey o la Ciudad de México, donde la demanda supera la oferta (Torregrosa et al., 2016).

Respecto de la viabilidad técnica de la regeneración hídrica, casos en otros países como el programa NEWater, en Singapur, demuestran que la combinación de ósmosis inversa, ultravioleta y gestión comunitaria puede lograr una aceptación pública del 85% (PUB, 2019). Acerca del aspecto sociocultural, el fracaso en Toowoomba, Australia, subraya la importancia de estrategias de comunicación transparentes (Hurlimann y Dolnicar, 2010) con el fin de mantener a la población informada y prevenir el rechazo del consumo de agua regenerada.

En este capítulo se presentan los principales conceptos clave acerca de la agua regenerada, y aquellos que podrían aplicarse para México. Adoptar esas lecciones en nuestro país implicaría no solo modernizar infraestructuras sino también abarcar el aspecto social que conlleva reconstruir la confianza ciudadana, históricamente erosionada por la inequidad en el acceso al recurso hídrico (Wilder y Romero-Lankao, 2006).

Conceptos clave, reúso convencional y agua regenerada

El agua regenerada se distingue del reúso convencional por su nivel de tratamiento y sus aplicaciones finales. Mientras el reúso tradicional implica emplear aguas residuales tratadas con procesos primarios o secundarios (por ejemplo, lagunas de oxidación) para riego o usos industriales no críticos, el agua regenerada requiere de un tratamiento avanzado o terciario (ultrafiltración, ósmosis inversa, desinfección UV) que garantice su calidad para

aplicaciones sensibles, como el consumo humano o la recarga de acuíferos (Asano et al., 2007). Este proceso elimina no solo patógenos, sino también contaminantes emergentes (fármacos, microplásticos) que no son eliminados por medio de tratamientos convencionales (Richardson y Ternes, 2018).

En la tabla 19.1 pueden verse las principales diferencias entre ambos tipos de agua.

Tabla 19.1. Diferencias clave del agua regenerada con el reúso no potable		
Aspecto	Reúso convencional	Agua regenerada
Tratamiento	Primario/secundario	Terciario/avanzado
Aplicaciones	Riego, industrial	Consumo humano, recarga de acuíferos
Normativa	Menos estricta (por. ej. NOM-003)	Cumple estándares de potabilidad
Riesgos	Contaminantes emergentes	Requiere eliminación de contaminantes de preocupación emergente (hormonas, pesticidas), CEC.

Fuente: elaboración propia.

Clasificación de los modelos de reutilización potable

La regeneración para consumo humano se clasifica en dos modelos, diferenciados por su proximidad al usuario final y sus requisitos técnicos. Uno es la reutilización potable directa (DPR, por sus siglas en inglés) y otro es el de la reutilización potable indirecta (IPR, por sus siglas en inglés).

La reutilización potable directa se define como la inyección del agua regenerada directamente a la red de distribución, sin paso intermedio por cuerpos naturales. Un ejemplo es el caso de la planta de Goreangab en Windhoek, Namibia. En ella se tratan 21000 m³/día de agua mediante filtración, ozonización y cloración, con lo que se abastece el 35% de la población (Lahnsteiner y Lempert, 2007). El principal reto que enfrenta este modelo es la exigencia de un monitoreo en tiempo real y la aceptación social, pues de este modo se elimina la barrera psicológica de fuentes naturales (Dolnicar et al., 2011).

La reutilización potable indirecta (IPR) se define como la integración del agua regenerada a acuíferos o embalses antes de su extracción y potabilización convencional. Por ejemplo, en Orange County, California, el sistema de

recarga de acuíferos trata 378 000 m³/día con ultrafiltración ósmosis inversa y UV/H₂O₂, para reducir la intrusión salina con lo cual se abastece a 850 000 personas (OCWD, 2020). La ventaja de este modelo es que la mezcla con aguas naturales atenúa el rechazo público, al percibirse como un ciclo hidrológico ampliado (EPA, 2017).

Condicionantes clave para el uso en potabilización

El proceso de potabilización del agua regenerada requiere el cumplimiento de estrictos estándares de calidad. Algunos de los condicionantes clave incluyen:

- **Calidad del efluente tratado.** Eliminación de contaminantes microbianológicos, químicos y emergentes (hormonas, fármacos, etcétera) a niveles seguros (Metcalf y Eddy, 2014).
- **Tecnologías avanzadas de tratamiento.** Puesta en marcha de procesos como la ultrafiltración, ósmosis inversa, adsorción con carbón activado y desinfección avanzada con radiación ultravioleta u ozono (Shannon et al., 2008).
- **Monitoreo y control riguroso.** Implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real para garantizar la calidad del agua en cada etapa del tratamiento.
- **Aceptación social.** Trabajar en la percepción pública del uso de agua residual tratada para consumo humano pues es una de las principales barreras para su implementación (Po et al., 2003).
- **Adecuación normativa.** Cumplimiento de los parámetros marcados en la NOM-127-SSA1-2021, y creación de nuevos lineamientos específicos para la reutilización potable del agua regenerada.

Marco conceptual integrado

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la viabilidad del agua regenerada depende de tres pilares:

- **Tecnológico.** Uso de membranas de última generación, como la ósmosis inversa de baja energía, para reducir costos (Shannon et al., 2008).
- **Social.** Empleo de estrategias de comunicación que informen a las personas de las ventajas del proceso y desmitifiquen falsos perjuicios,

como visitas guiadas a plantas. En Singapur, de esta manera el proyecto NEWater logró 85% de aceptación en la población (PUB, 2019).

- **Normativo.** Desarrollar estándares específicos para reutilización de agua directa e indirecta (DPR e IPR), como los establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2012) o la Directiva Europea 2020-2184.

Experiencias internacionales en el uso de agua regenerada

Respecto del empleo del agua regenerada, en varios países se han implementado proyectos que muestran su viabilidad, como los que a continuación se describen.

- **Programa NEWater en Singapur.** Este programa produce agua regenerada de alta calidad mediante procesos avanzados de tratamiento, integrándola en el sistema de abastecimiento público con altos niveles de aceptación social (PUB, 2019).
- **Proyecto de recarga de acuíferos en Orange County, California.** La planta de recarga de acuíferos de Orange County en Estados Unidos es un modelo de éxito en la reutilización indirecta potable. En ella se utiliza filtración avanzada y ósmosis inversa para generar agua de alta calidad (OCWD, 2020).
- **Estrategia nacional del agua en Israel.** Con un avanzado sistema de reutilización de aguas residuales, más del 80% del agua residual tratada se usa en la agricultura y, en algunos casos, se destina a la potabilización tras un proceso de recarga de acuíferos (Tal, 2016).

No obstante el éxito en otras naciones, hay dos casos que vale la pena mencionar que han enfrentado el rechazo social.

- **Toowoomba, Australia.** Un referéndum sobre la implementación de agua regenerada para consumo humano fue rechazado debido a la desconfianza pública y la percepción negativa sobre la seguridad del agua tratada (Hurlimann y Dolnicar, 2010).
- **Windhoek, Namibia.** A pesar de ser un caso pionero en la reutilización potable directa, la implementación del suministro de agua regenerada ha enfrentado desafíos constantes en cuanto a percepción pública y confianza en la seguridad del agua (Lahnsteiner y Lempert, 2007).

Situación normativa y retos en México

En México, la NOM-127-SSA1 establece los límites permisibles de calidad del agua para consumo humano, sin contemplar la posibilidad de utilizar agua residual tratada en su suministro. Algunos de los retos normativos incluyen:

- **Falta de regulación específica.** La ausencia de un marco normativo que permita la potabilización de agua regenerada impide su adopción en ciudades con estrés hídrico.
- **Disparidad en estándares de calidad.** Mientras países como Singapur y Estados Unidos han desarrollado normativas estrictas para el agua regenerada (PUB, 2019; EPA, 2012), México carece de lineamientos claros en esta materia.
- **Desafíos institucionales.** La coordinación entre organismos reguladores, operadores de agua y entidades de salud pública es limitada lo que dificulta el desarrollo de proyectos de reutilización potable.
- **Falta de inversión en infraestructura.** La reutilización de agua regenerada para consumo humano requiere plantas de tratamiento avanzadas y redes de distribución seguras, lo cual implica inversiones significativas en tecnología y operación.

Conclusiones

El uso de agua regenerada para consumo humano es una alternativa viable para enfrentar el estrés hídrico, pero requiere un marco normativo claro, tecnologías avanzadas de tratamiento y estrategias de comunicación para mejorar la aceptación pública. La experiencia internacional demuestra que su implementación puede ser exitosa si se cumplen tales criterios.

Referencias

- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., y Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. McGraw-Hill.
- Dolnicar, S., Hurlimann, A., y Grün, B. (2011). What affects public acceptance of recycled and desalinated water? *Water Research*, 45(2), pp. 933-943. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3020276/>

- U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Guidelines for Water Reuse*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *Potable Reuse Compendium*. United States. https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-01/documents/potablereusecompendium_3.pdf
- Gerrity, D., Gamage, S., Trenholm, R. A., Pecson, B. M., & Drewes, J. E. (2011). *Beyond the status quo: A review of progress and limitations in indirect potable reuse*. *Environmental Science & Technology*, 45(9), pp. 5673-5681.
- Hurlimann, A., y Dolnicar, S. (2010). When public opposition defeats alternative water projects—the case of Toowoomba Australia. *Water Research*, 44(1), pp. 287-297.
- Lahnsteiner, J., y Lempert, G. (2007). Water management in Windhoek, Namibia. *Water Science & Technology*, 55(1-2), pp. 441-448. <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/55/1-2/441/14202/Water-management-in-Windhoek-Namibia?redirected-From=PDF>
- Metcalf & Eddy (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill.
- Orange County Water District. (2020). *Groundwater Replenishment System*. <https://www.ocsan.gov/news/groundwater-replenishment-system-spring-2023/>
- PUB (2019). *Singapore Water Story*. Public Utilities Board, Singapore.
- Rodda, N., Salukazana, L., Jackson, S., & Smith, M. (2020). Water Reuse in South Africa. *Water SA*, 46(1), pp. 1-8.
- Tal, A. (2016). *Israel's sustainability challenges*. Columbia University Press.

20 Gestión del agua en México: desafíos y oportunidades

David Humberto Sánchez Navarro
Claudia Annette Fernández Pérez
Universidad Autónoma de Chihuahua

En México, el desarrollo urbano y el cambio climático han complicado la gestión de los sistemas hídricos lo que exacerba problemas como la escasez de agua y la sobreexplotación de recursos. Para 2050, se espera un aumento de 30% en la demanda de agua, lo que incrementará la demanda de alimentos y energía, así como un aumento en los conflictos por el agua.

Aunque México ha logrado avances en la cobertura de agua potable, persisten diferencias en la eficiencia de las instituciones responsables, que deben adaptarse a limitaciones físicas, económicas y políticas. A pesar de los esfuerzos, el suministro sigue siendo insuficiente e irregular.

En este capítulo se busca comprender el papel de las instituciones hídricas y promover la gobernanza para una gestión sostenible del agua.

Palabras clave: gestión de sistemas hídricos, sobreexplotación de recursos hídricos, cobertura de agua potable.

Introducción

El desarrollo urbano y el cambio climático han complicado la gestión de los sistemas hídricos, lo que a su vez exacerba problemas como la escasez de agua y la sobreexplotación de recursos. Además del crecimiento de la población y la competencia por el agua, la infraestructura envejecida presiona los sistemas de suministro (Donevska y Panov, 2019). La creciente densidad urbana y expansión ha convertido a las ciudades en focos de vulnerabilidad, complicando la provisión de servicios básicos. Para 2050 se espera un aumento del 30% en la demanda hídrica, lo que incrementará también la demanda de alimentos y energía, lo cual generará más conflictos por el agua (Briseño y Sánchez, 2018).

En México, la sobreexplotación y contaminación de los recursos hídricos, junto con la creciente escasez, han causado un estrés hídrico significativo, especialmente en el norte y las megaciudades. A pesar de reformas institucionales, la nación enfrenta dificultades para garantizar servicios adecuados de agua potable y de preservación de sus acuíferos y ecosistemas (Barkin, 2012). En su territorio, existe un desequilibrio en la distribución de los recursos hídricos, con alta concentración de población y actividad económica en áreas con baja disponibilidad de agua, lo que dificulta proporcionar servicios de calidad (Tortajada, 2006; Conagua, 2019). Aunque México ha logrado avances en la cobertura de agua potable, persisten diferencias en la eficiencia de las instituciones responsables, que deben adaptarse a limitaciones físicas, económicas y políticas. No obstante los esfuerzos, el suministro sigue siendo insuficiente e irregular (González-Villarreal y Arriaga-Medina, 2014). Este estudio busca comprender el papel de las instituciones hídricas en México y promover la gobernanza para una gestión sostenible del agua.

Características del agua en México

México tiene una población de 126.7 millones de habitantes y una economía clasificada como la decimoquinta más grande del mundo (Banco Mundial, 2023). En extensión territorial ocupa el puesto 14 con más de 1.96 millones de km². Su geografía y clima diverso, marcado por fenómenos meteorológicos, resultan en una gran variedad climática, aunque es principalmente seco, con una precipitación media anual de 760 mm, por debajo del promedio mundial de 1127 mm. Dos tercios del país tienen precipitaciones menores

a 500 mm, en particular en las regiones norte y central, clasificadas como áridas o semiáridas (Aguilar-Barajas et al., 2016).

México recibe anualmente 1 449 471 millones de m³ de agua por precipitación, de los cuales 72.1% se evapotranspira, el 21.4% se escurre y el 6.4% recarga los acuíferos. El país tiene aproximadamente 1500 cuencas, con la mayor parte del agua superficial concentrada en la mitad sur. El territorio está dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas, que comprenden 37 regiones hidrológicas, 1471 cuencas y 653 acuíferos (Sámano-Romero et al., 2016).

El país cuenta con 451 584.7 millones de m³ de agua dulce renovable, considerando las importaciones y exportaciones con países vecinos (Conagua, 2019). En cuanto a las aguas subterráneas, la disponibilidad ha disminuido un 37% debido al consumo excesivo, lo que dejó 408 acuíferos con disponibilidad a enero de 2018 (Arreguín-Cortés et al., 2020).

La disponibilidad de agua es desigual porque el norte enfrenta severas limitaciones y el sur también presenta problemas como la contaminación y el uso ineficiente del recurso, aunque con menos restricciones. Según la Conagua, más del 50% de la población vive en regiones que podrían enfrentar estrés hídrico (Conagua, 2019).

En la figura 20. 1 se muestran las regiones hidrológicas y rankings de sostenibilidad hídrica de subcuencas según Cervantes Jiménez, et al. (2020).

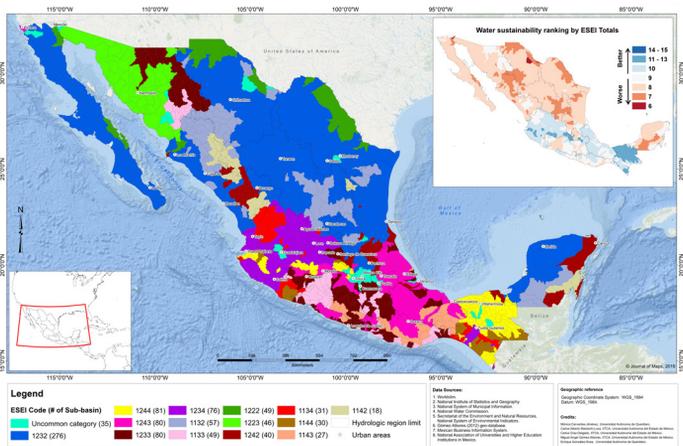


Fig. 20.1. Límites de regiones hidrológicas y rankings de sostenibilidad hídrica de subcuencas en México (Cervantes-Jiménez, et al., 2020).

Marco legal del agua en México

En México, la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento está basada en la Constitución, que establece un marco de gestión descentralizada. En los artículos 4, 27 y 115 se reconoce el derecho humano al agua, se asignan a los municipios la responsabilidad de ofrecer los servicios relacionados con ella y de otorgar concesiones a organismos públicos, privados o mixtos para brindarlos (Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión, 2021). Por tanto, el gobierno federal es propietario de los recursos hídricos y las entidades subnacionales son responsables de su suministro (Conagua, OCDE e IMTA, 2010).

La Ley Nacional de Aguas (LAN) y la Ley Federal de Derechos (LFD), establecen los principios para la gestión hídrica, así como la autorización federal para su uso y descarga; también con ellas se regulan las tarifas aplicando los principios de "quien usa el agua paga" y "quien contamina paga" (Conagua, OCDE e IMTA, 2010). Existen normas oficiales mexicanas (NOM) que promueven el uso sustentable del agua.

A nivel estatal, los gobiernos son responsables de la planificación, regulación y desarrollo de infraestructura hídrica así como de la prestación de servicios de agua y saneamiento; junto con los Congresos estatales se fijan las tarifas, aunque esta autoridad puede delegarse a las comisiones estatales del agua.

Son los municipios quienes tienen la responsabilidad de abastecer, tratar y desalojar el agua, por ello algunos estados tienen leyes específicas para la gestión de estos servicios. Desde 1983, los municipios pueden prestar esos servicios directamente o mediante organismos operadores (OO). Estos organismos que son importantes en áreas urbanas densamente pobladas. Aunque algunos OO se han consolidado, muchos aún enfrentan desafíos para lograr una operación autosostenible y de calidad (Barkin, 2005; Camacho y Casados, 2017).

Desafíos nacionales de la gestión del agua

México enfrenta desafíos críticos en la gestión del agua, exacerbados por el cambio climático, la escasez, la contaminación y el crecimiento demográfico.

La distribución irregular de lluvias y la alta concentración poblacional en zonas con baja disponibilidad de agua agravan la situación. La agricultura consume el 77% del recurso y enfrenta presión por el crecimiento poblacional y los efectos del cambio climático (Bravo-Cadena et al., 2021). En 2018, el 36.6% del agua de riego provino de fuentes subterráneas, aumentando su extracción en un 18% desde 2009 (Conagua, 2019). La falta de pago por derechos de extracción contribuye a la sobreexplotación.

Con un consumo per cápita de 1978 m³/año, México necesita importar agua (Mekonnen y Hoekstra, 2011). El estrés hídrico alcanza el 47% en el norte y centro del país (Conagua, 2019; Arreguín-Cortés et al., 2020). Para 2050, el crecimiento poblacional del 20% incrementará la demanda y la presión sobre los recursos hídricos.

La contaminación reduce aún más la disponibilidad de agua. Se calcula que 70% de los cuerpos de agua están afectados por residuos agrícolas y aguas residuales no tratadas (Arreguín-Cortés et al., 2020).

Además, la competencia por el agua genera conflictos entre niveles de gobierno y usuarios, en especial en cuencas y acuíferos transfronterizos. El sistema de asignación de agua enfrenta problemas como el uso no autorizado y la falta de pago, lo que contribuye a la sobreexplotación (Barkin, 2012). La expansión urbana e industrial ha fomentado un mercado paralelo de derechos de agua (Barkin, 2005). Aunque existen leyes, su aplicación es débil, lo que también propicia la sobreexplotación.

La descentralización de la gestión hídrica a través de los organismos operadores no ha logrado los objetivos esperados pues su desempeño es deficiente (Briseño y Sánchez, 2018) debido a la descoordinación entre procesos ecosistémicos y escalas de gestión (Cotler et al., 2022). El 90-95% de los OO municipales operan con déficit financiero, agravado por el crecimiento poblacional, la creciente demanda de servicios y los conflictos sociales (Cotler et al., 2022). La eficiencia física de los OO es de 52.7% y la comercial de 76.3%, es decir, genera pérdidas económicas y depende de subsidios gubernamentales (Briseño y Sánchez, 2018).

Conagua regula el uso del agua mediante permisos y tarifas, pero la baja recuperación de costos limita el financiamiento de proyectos y fomenta la dependencia de subsidios. En 2020, la inversión en proyectos hídricos fue solo 9% de lo recomendado (ANEAS, 2020).

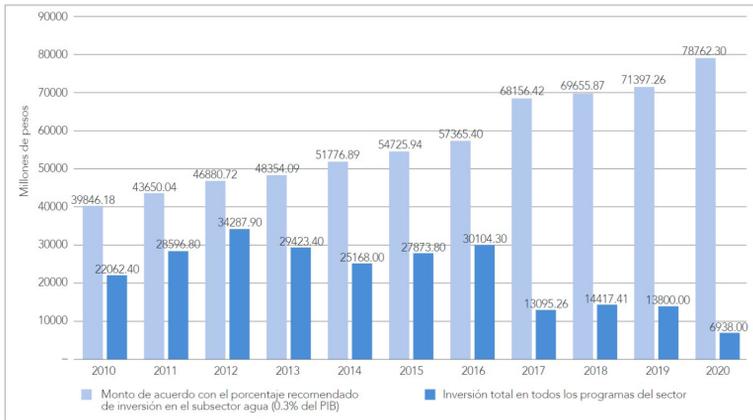


Fig. 20.2. Inversiones públicas en México para la gestión de recursos hídricos en relación con los requerimientos del sector (ANEAS, 2020).

La escasa cooperación entre los niveles de gobierno, el sector público y privado, y la falta de participación de actores sociales agravan la situación. Además, la falta de transversalidad en las estrategias y acciones intensifica el problema.

En México, la inversión en infraestructura hidráulica ha aumentado, pero se ha descuidado su operación, mantenimiento y gestión (Arreguín-Cortés et al., 2020). La mitad de las redes municipales requieren renovación (IMTA y SEMARNAT, 2018), y entre 2014 y 2018, el presupuesto de Conagua disminuyó de 55 627 a 32 267 millones de pesos (Conagua, 2019). A pesar de esto, los ingresos por aprovechamiento del agua han generado excedentes (2012-2018).

El camino a seguir

La gestión de los recursos hídricos en México enfrenta vulnerabilidades significativas debido a una participación social inadecuada y las limitaciones del modelo de administración actual. Esto se debe a la falta de claridad en las regulaciones y estructuras organizacionales, y a la deficiencia en la coordinación entre los actores involucrados.

El estrés hídrico en México aumentará para 2030, por lo que se requieren estrategias regionales específicas, como mitigar la escasez en zonas áridas y controlar la contaminación en áreas industriales.

La inversión en investigación y desarrollo es esencial para mejorar técnicas de medición, monitoreo y conservación del agua. La mayoría de los OO en México no cubren sus costos operativos debido a la baja eficiencia y tarifas inadecuadas (Conagua, OCDE e IMTA, 2010). Se necesita una estructura tarifaria que refleje los costos reales del servicio y permita la sostenibilidad financiera (Camacho y Casados, 2017).

La implementación de un modelo de gestión que priorice la autosostenibilidad, la seguridad del agua y la integración de tecnologías avanzadas es clave (Casados Prior, et al., 2018).

El sector agrícola debe adoptar tarifas de recuperación de costos para aliviar la carga sobre las autoridades hídricas y mejorar su gestión (Conagua, OCDE e IMTA, 2010). Se requiere actualizar la normatividad para reducir los subsidios al bombeo de agua para riego (Conagua, OCDE e IMTA, 2010).

La fragmentación de políticas y regulaciones dificulta la gestión hídrica, por lo que es necesario armonizar el marco legal y establecer un sistema justo y transparente de asignación de derechos de agua (Briseño y Sánchez, 2018). Modificar la política hídrica y la Ley General de Aguas es crucial para abordar los desafíos actuales y promover prácticas sostenibles. Se deben fortalecer las estructuras de gobernanza, explorar nuevas fuentes de financiamiento y garantizar un marco legal estable para mejorar la sostenibilidad del servicio.

También se deben revisar los acuerdos de cuencas transfronterizas para garantizar la cooperación internacional y una gestión equitativa de los recursos hídricos.

Además, es fundamental profesionalizar al personal y fomentar la participación de expertos de la sociedad civil en la gestión del agua.

Es necesario calcular los costos reales de extracción y reconocer el agua como un recurso finito para incentivar la conservación y la equidad en su acceso. La distribución desigual del agua y su uso ineficiente generan desperdicio y conflictos, especialmente en el sector agrícola, que consume el 77% del agua del país. Las disparidades geográficas son significativas: las regiones con menor disponibilidad albergan al 77% de la población y el 82% del PIB (Arreguín-Cortés et al., 2020), mientras que el 70% de los cuerpos de agua están contaminados.

Se requieren regulaciones estrictas para evitar el bombeo incontrolado de aguas subterráneas, así como monitoreo y políticas de promoción de prácticas sostenibles (Zamora y Sanchez, 2020).

Para lograr la sostenibilidad hídrica en 24 años, se requieren 48.8 mil millones de pesos en infraestructura y 17 mil millones en operación y mantenimiento (Arreguín-Cortés et al., 2020). La colaboración entre gobiernos, sector privado y organizaciones internacionales es clave, y se debe destinar el ingreso de tarifas al sector para fomentar el uso responsable.

Conclusiones

Los recursos hídricos de México enfrentan serios desafíos debido a factores históricos, socioeconómicos y ambientales. A pesar de los esfuerzos en las últimas cuatro décadas, los problemas de escasez, disponibilidad limitada y creciente demanda se han intensificado. Estos problemas se deben a la falta de transversalidad en las estrategias, asignación presupuestaria limitada y desconexión entre la planificación y la implementación. Para superarlos, es crucial fortalecer la planificación hídrica, brindar apoyo financiero y adoptar políticas innovadoras que promuevan sostenibilidad, eficiencia, equidad y valor social.

Además, es esencial desarrollar un modelo de gestión que priorice la autosostenibilidad, la seguridad del agua y la viabilidad a largo plazo, especialmente en el contexto del desarrollo urbano y la gestión de cuencas. Implementar estas reformas permitirá mejorar la gestión del agua, asegurar su uso sostenible y garantizar el acceso equitativo a la población, lo que requiere un enfoque gradual y a largo plazo integrado con la democracia en las decisiones sobre los recursos hídricos.

Referencias

- Aguilar-Barajas, I., Sisto, N. Magaña-Rueda, V., Ramírez, A. I. y Mahlknecht, J. (2016). Drought policy in Mexico: a long, slow march toward an integrated and preventive management model. *Water Policy*, 18, pp. 107-121. https://www.researchgate.net/publication/309463085_Drought_policy_in_Mexico_A_long_slow_March_toward_an_integrated_and_preventive_management_model
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Perez, M. y Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Water challenges in Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(2), pp. 341-371.

- Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México. (2020). Agua y Saneamiento.
- Banco Mundial. (2023) *Indicators*. <https://data.worldbank.org/indicator>
- Barkin, D. (2012). The Governance Crisis in Urban Water Management in Mexico. *Water Resources in Mexico*. Oswald Spring, U. (ed.) Springer, pp. 379-393. https://www.researchgate.net/publication/226957920_The_Governance_Crisis_in_Urban_Water_Management_in_Mexico
- Barkin, D., (2005). The contradictions of urban water management in Mexico. *Vertigo*. <https://journals.openedition.org/vertigo/1881#text>
- Bravo-Cadena, J., Pavón Numa, P., Balvanera, P., Sanchez-Rojas, G. y Razo-Zarate, R. y otros, (1 de febrero 2021). Water Availability–Demand Balance under Climate Change Scenarios in an Overpopulated Region of Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), pp. 1-16. <https://produccion.siia.unam.mx/Publicaciones/ProdCientif/PublicacionFrw.aspx?id=546722>
- Briseño, H. y Sánchez, A., 2018. Decentralization, consolidation, and crisis of urban water management in Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(4), pp. 25-47. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222018000400025&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Camacho, H. y Casados, J. (2017). *Regulación de los servicios de agua potable y saneamiento en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua. <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/download/?key=221>
- Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*, <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>
- Casados Prior, J.A., Rodríguez Varela, J.M., De la Peña, E. D., Sainos Candelario, A. y Martínez Ocampo, G. A. (2018). *Regulación de los servicios de agua potable y saneamiento. Segunda etapa: diseñar y crear un nuevo modelo de gestión, acorde al sistema regulatorio. Proyecto HC-1818.1. Informe final*. Coordinación de Hidráulica, Semarnat-IMTA. <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/download/?key=221>
- Cervantes-Jiménez, M., Díaz Delgado, C., González Sosa, E. y Gómez Albores, M. A. (2020). Proposal of a water management sustainability index for the 969 sub-basins of Mexico. *Journal of Maps*, 16(2), pp. 432-444. https://www.researchgate.net/publication/341967316_Proposal_of_a_water_management_sustainability_index_for_the_969_sub-basins_of_Mexico
- Comisión Nacional del Agua. (2019). *Estadísticas del Agua en México*. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>

- Conagua, OECD, IMTA. (2010). *Financing water resources management in Mexico*. <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/OECD.pdf>
- Cotler, H., Cuevas, M. L., Landa, R. y Frausto, J. M. (enero 2022). Environmental governance in urban watersheds: the role of civil society organizations in Mexico. *Sustainability*, 14(2), p. 988. https://www.researchgate.net/publication/357903241_Environmental_Governance_in_Urban_Watersheds_The_Role_of_Civil_Society_Organizations_in_Mexico/link/61f42c9e4393577abef7a51d/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19
- Donevska, K. R. y Panov, A. (septiembre 2019). Climate change impact on water supply demands: casestudy of the city of Skopje. *Water Science and Technology: Water Supply* 19(7), pp. 2172-2178. <https://www.proquest.com/docview/2311444288?sourcetype=Scholarly%20Journals>
- González-Villarreal, F. y Arriaga-Medina, J. (2014). Crisis de los sistemas de agua potable en México. *H2O Gestión del Agua*, 1(3), pp. 4-10.
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2011). The Green, Blue and Grey Water Foot print of Crops and Derived Crop Products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, pp. 1577-1600. <https://www.waterfootprint.org/resources/Mekonnen-Hoekstra-2011-Water-FootprintCrops.pdf>
- Sámamo-Romero, G., Mautner, M., Chávez-Mejía, A. y Jiménez-Cisneros, B. (2016). Assessing Marginalized Communities in Mexico for Implementation of Rainwater Catchment Systems. *Water*, 8(4), p. 140. <https://www.mdpi.com/2073-4441/8/4/140/pdf?version=1460119141>
- Tortajada, C., (2006). *Water Management in Mexico City Metropolitan Area*. *International Journal Water Resources Development*, 22(2), pp. 353-376. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07900620600671367>
- Zamora Sáenz, I. y Sanchez Gálvez, D. (eds.) (2020). *Panorama y perspectivas del agua en México, 2019-2024*, Instituto Belisario Domínguez, LXIV Legislatura, Senado de la República. http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/4803/CI_62.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Directorio de autores

Aguilar Chávez, Ariosto
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
ariosto.aguilar@posgrado.imta.edu.mx

Arganis Juárez, Maritza Liliana
Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México
MArganisJ@iingen.unam.mx

Arreguín Cortés, Felipe Ignacio
Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México
farreguin2011@gmail.com

Azano Carrillo, Yoshiro Susumo
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores
de Occidente, Tlaquepaque, Jalisco
ic724336@iteso.mx

Barajas Alvarado, Diana Vanesa
Tecnológico de Monterrey
A01644123@tec.mx

Barajas Madrigal, Ulises Absalom
Universidad Michoacana de San Nicolás
de Hidalgo
1595216d@umich.mx

Bonilla Porras, José Antonio
Knight Piésold Consulting S.A. de C.V.
jbonilla@knightpiesold.com

Carrizosa Elizondo, Eliseo
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
ECarrizosaE@iingen.unam.mx

Ceceña Osuna, Jesús Eduardo
Sistemas Hidráulicos, Culiacán
duardoce@gmail.com

Chan Gaxiola, Eduardo
Comisión Nacional del Agua
eduardo.chan.gx@gmail.com

Contreras López, Christopher
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
christopher_contreras@uaeh.edu.mx

Del Conde Guadalajara, Juan Pablo
Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C.
juan_pablo@igh.com.mx

De Luna Cruz, Faustino
Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México
FLunaC@iingen.unam.mx

Domínguez Mora, Ramón
Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México
RDominguezM@iingen.unam.mx

Fernández Pérez, Claudia Annette
Universidad Autónoma de Chihuahua
cfernandezp@uach.mx

Figuroa Mendiola, Juan Manuel
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Jiutepec, Morelos
juan_figuroa@tlaloc.imta.mx

Gallegos de Lira, Luis Armando
Modelo Integral de Aguas de Aguascalientes
lgallegosdelira@gmail.com

García Camacho, Saúl
Tecnológico de Monterrey
sgarcia@tec.mx

García Romero, Liliana
Universidad Michoacana de San Nicolás
de Hidalgo
liliana.romero@umich.mx

González Sandoval, María del Refugio
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
mrgonzalez@uaeh.edu.mx

Guerrero Angulo, José Óscar
Sistemas Hidráulicos, Culiacán
guerangulo@hotmail.com

Guerrero Rodríguez, Mauricio
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
m_guerrero@uaeh.edu.mx

Herrera Alanís, José Luis
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
JHerreraA@iingen.unam.mx

Hernández Barrientos, Elizabeth Rosario
Posgrado en Ciencias y Tecnología del Agua,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
elizabeth.hernandez@posgrado.imta.edu.mx

Herrera Peraza, Eduardo
 Centro de Investigación de Materiales Avanzados
 Eduardo.herrera@cimav.edu.mx

Hernández Samaniego, Eduardo
 Universidad Autónoma de Chihuahua
 esamaniegojmas@gmail.com

Limón Ochoa, Sofía
 Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores
 de Occidente, Tlaquepaque, Jalisco
 ic727623@iteso.mx

Llaguno Guilberto, Oscar Jesús
 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
 Jiutepec, Morelos
 Oscar_llaguno@tlaloc.imta.mx

Madrigal Barrera, José Jaime
 Universidad Michoacana de San Nicolás
 de Hidalgo
 jose.madrigal@umich.mx

Marengo Mogollón, Juan Francisco Humberto
 Comisión Nacional del Agua
 hmarengom@gmail.com

Medina Mendoza, Raúl
 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
 Jiutepec, Morelos
 Raul_molina@tlaloc.imta.mx

Mendoza Reséndiz, Alejandro
 Instituto de Ingeniería,
 Universidad Nacional Autónoma de México
 AMendozaR@iingen.unam.mx

Minuche Cruz, Saúl Andrés
 Tecnológico de Monterrey, México
 A01642252@tec.mx

Morales Rayo, Jomaelah
 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
 Jiutepec, Morelos
 jomaelah@tlaloc.imta.mx

Navarro Gómez, Carmen Julia
 Universidad Autónoma de Chihuahua
 cjnavarro@uach.mx

Navarro Gómez, Humberto Iván
 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
 humberto_navarro@uach.edu.mx

Ocampo Guerrero, Nikte Norma
 Universidad Nacional Autónoma de México
 nikteoeg@gmail.com

Ochoa Alejo Leonel Humberto
 Independiente
 leonelochoa@yahoo.com.mx

Ochoa González, Gil Humberto
 Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores
 de Occidente, Tlaquepaque, Jalisco
 gilchoa@iteso.mx

Olmos Márquez, Mario Alberto
 Universidad Autónoma de Chihuahua
 Molmos@uach.mx

Ortiz Burciaga, Vanessa
 vanessa.ortiz@chihuahua.gob.mx
 Junta Central de Agua y Saneamiento
 de Chihuahua

Peña Balderas, Miguel Alberto
 Universidad Autónoma de Chihuahua
 miguel.pena.jmas@gmail.com

Preciado Jiménez, Margarita Elizabeth
 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
 Jiutepec, Morelos
 preciado@tlaloc.imta.mx

Ramírez León, José Manuel
 Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores
 de Occidente, Tlaquepaque, Jalisco
 jmramirezleon@iteso.mx

Rivera Flores, Alma Itzel
 Knight Piésold Consulting S.A. de C.V.
 irivera@knightpiesold.com

Robles Pereyra, Omar Ulises
 Posgrado en Ciencias y Tecnología del Agua,
 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
 omar.robles@posgrado.imta.edu.mx

Rodríguez Heredia, Sandra Lizeth
 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
 1596253@umich.mx

Rodríguez Varela, José Manuel
 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
 Jiutepec, Morelos
 Manuel_rodriguez@tlaloc.imta.mx

Directorio

Sánchez Quispe, Sonia Tatiana
Universidad Michoacana de San Nicolás
de Hidalgo
quispe@umich.mx

Sánchez Navarro, David Humberto
Universidad Autónoma de Chihuahua
dhsanchez@uach.mx

Sánchez Navarro, Jesús Rubén
Universidad Autónoma de Chihuahua
ingsanchezn@gmail.com

Vargas del Río, David
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores
de Occidente,
Tlaquepaque, Jalisco
davidvar@iteso.mx

Zamudio Zavala, Pablo Enrique
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores
de Occidente,
Tlaquepaque, Jalisco
pezamudio@iteso.mx

Transformando el ciclo del agua, El reúso es responsabilidad de todos es una obra coordinada por tres especialistas en ingeniería hidráulica, miembros de la Asociación Mexicana de Hidráulica, quienes presentan trabajos de expertos en temas del agua de todo el país, con reconocimiento internacional.

El libro consta de 20 capítulos que abordan aspectos relevantes como el calentamiento global y climático, la enseñanza de la hidráulica, la normatividad en materia de agua potable y restaurada, la gestión y el suministro, la evaluación ambiental y la seguridad de las presas de almacenamiento, de jales e hidroeléctricas, la medición en canales, así como el comportamiento pluvial, decisivo en la actualidad.

La obra tiene el propósito de aportar referentes para otros estudios relacionados así como presentar resultados y propuestas que contribuyan al mejor uso y provecho del agua en México, sin olvidar el uso de nuevas herramientas tecnológicas como la IA.



ANIVERSARIO

ASOCIACIÓN MEXICANA DE HIDRÁULICA

ISBN: 978-607-97532-3-8



9 786079 753238