



CONGRESO IMTA 2014

Editores: Víctor Bourguett Ortiz y
Ariosto Aguilar Chávez



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua



CONGRESO IMTA 2014

333.91 Bourguett Ortiz, Víctor Javier
B25 Congreso IMTA 2014 / Víctor Javier Bourguett Ortiz y Ariosto Aguilar Chávez editores.
-- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2014.

144 p. : il.
ISBN: 978-607-9368-18-0

1. Desarrollo de recursos hídricos 2. Congresos

Coordinación técnica:
Coordinación de Desarrollo Profesional e Institucional.
Subcoordinación de Posgrado.

Coordinación editorial:

Coordinación de Comunicación,
Participación e Información.
Subcoordinación de Vinculación, Comercialización
y Servicios Editoriales.

Primera edición: 2014.

Ilustración de portada:
© Óscar Alonso Barrón

Diseño editorial:
Gema Alín Martínez Ocampo

Diagramación y formación
Luis Enrique Nájera Zamora

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
MÉXICO
www.imta.gob.mx

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

ISBN: 978-607-9368-18-0

Colección: “Informes”

DIRECTORIO

Director General del IMTA

M. en I. Víctor Javier Bourguett Ortiz

Coordinador de Hidráulica

Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka

Coordinador de Hidrología

M. A. José Raúl Saavedra Horita

Coordinador de Tratamiento y Calidad del Agua

Dra. Alejandra Martín Domínguez

Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Nahun Hamed García Villanueva

Coordinador de Desarrollo Profesional e Institucional

M. I. Alfredo Ranulfo Ocón Gutiérrez

**Coordinador de Comunicación,
Participación e Información**

M. C. Jorge Arturo Hidalgo Toledo

Coordinador de Administración

C. P. Juan Manuel Barajas Piedra

Coordinador de Asesores

Ing. Sergio Raúl Reynoso López

ÍNDICE

Predicción de los cambios en las curvas de las frecuencias de inundación debido al cambio climático E. Mateos, J. S. Santana, M. Montero e I. Rivas	9
Sistema de captación de agua de lluvia en Cherán, Michoacán E. Cervantes, D. Hernández, M. A. Córdova, S. Vázquez e I. Hernández	24
Diseño de esquemas de remediación de un acuífero granular-fracturado contaminado por cromo C. Gutiérrez, A. Martín, M. Martínez, S. Pérez, I. Villegas, S. Garrido, C. Calderón, S. Gelover y J. García	33
Plan para el manejo sustentable de la subcuenca Tejalpa en el Nevado de Toluca M. A. Yáñez, P. Rivera, W. Wruck, M. Gutiérrez, M. Medina, A. Paredes, G. Palma, R. Hernández y J. Ramírez	41
Riesgos sanitarios por exposición a contaminantes emergentes en agua de abastecimiento J. E. Cortés, C. G. Calderón, E. B. Estrada, A. González, E. Ramírez, L. Montellano, S. L. Gelover, J. Cruz, E. V. Serrano y A. Gómez	49
Consulta pública para la integración del PNH 2014 -2018 R. Piña	64
Programas de prevención contra contingencias hidráulicas para los trece organismos de cuenca de la Conagua J. Lafragua, Y. Solís, J. Salgado, A. Bravo, M. Preciado, I. Rivas, E. Aguilar, M.A. Suárez y A. Güitrón	70

La dinámica de fluidos computacional (CDF) como herramienta para simular el comportamiento de sistemas y dispositivos de interés agrícola	
J. Flores, W. Ojeda y M. Íñiguez	78
Dictamen técnico, financiero, económico y legal sobre el estado actual de las plantas de tratamiento de agua residual, bajo la operación de Fonatur	
C. A. Servín, G. Mantilla, L. Sandoval, A. C. Tomasini, F. Pozo, E. B. Estrada, A. Ramírez, E. Ramírez, M. A. Garzón y R. Romero	85
Elaboración de estudios, proyecto ejecutivo para la estabilización del suelo y prevención de falla estructural en la rampa y túnel del vado de Atemajac, ubicado en la línea 1 del tren eléctrico urbano, Guadalajara, Jalisco	
G. Salgado, J. Avilés y R. Álvarez	89
Modelación numérica del aporte de agua del manto freático al requerimiento de riego de los cultivos	
E. Castillo y H. E. Saucedo	96
Desarrollo de metodologías y su aplicación para la determinación de cianobacterias y compuestos emergentes en cuerpos de agua y agua potable	
M. Sánchez, M. Avilés, N. Ramírez y L. González	103
Analizar la vulnerabilidad y evaluar los costos del cambio climático en OOAPAS	
H.D.CamachoyA.E.García.....	111
Estudio para la caracterización y diagnóstico de seguridad de ocho presas, clasificadas con alto riesgo	
V. Alcocer, R. Flores, J. A. González, J. Avilés, J. Espinoza, J. Brena, C. Castillo, J. Balancán y R. Gontes	119

Estimación de impactos de viento superficial, humedad relativa, humedad específica y presión superficial en un periodo histórico y bajo escenarios de cambio climático en dos periodos futuros A. Salinas, E. Mateos, G. Colorado, M. Montero, M. E. Mayay M. González	127
Estudio para la detección de fuentes contaminantes por descargas de agua residual al río Atoyac, entre la ciudad de Oaxaca y la presa Paso Ancho J. Izurieta, P. Alonso, Y. Pica, P. Rivera, G. Mantilla, A. Ramírez y L. Bravo	138





PREDICCIÓN DE LOS CAMBIOS EN LAS CURVAS DE LAS FRECUENCIAS DE INUNDACIÓN DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

E. Mateos, M. J. Montero, J. S. Santana e I. Rivas





Resumen

Se comparan las curvas de las frecuencias intensidad-duración-periodo de retorno (i-d-T) entre datos observados, para el periodo 1960-1999, y modelados para el periodo 1956-2099, en tres cuencas mexicanas. Para los datos modelados, se calculó el porcentaje de cambio, encontrándose un aumento en las tres cuencas seleccionadas. Se encontró que la subregión Grijalva-La Concordia es la que presenta un mayor cambio, 51% en promedio, seguido de las cuencas río Conchos 1 (13%) y Cutzamala (8%). Se calcularon los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, y duraciones de lluvia 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 minutos. Se calculó el promedio ponderado por cuenca, usando polígonos de Voronoi, de cada periodo de retorno de las observaciones y de las observaciones más el porcentaje de incremento de los modelos.

En las cuencas Conchos 1 y en la subregión Grijalva-La Concordia habrá una menor intensidad de precipitación. Sin embargo, para el modelo MRI experimento RCP 8.5, las lluvias serán más intensas en Conchos 1 y en Grijalva-La Concordia, cuando éstas tengan duraciones mayores a una hora. En la cuenca río Cutzamala, la intensidad de la precipitación se incrementa para todos los modelos y experimentos en todas las duraciones, en comparación con las estaciones climatológicas.

Introducción

Las curvas de precipitación i-d-T son representaciones gráficas de la cantidad de agua que cae en un periodo de tiempo determinado en las zonas de captación (Dupont y Allen, 2000). Éstas se utilizan para ayudar a los ingenieros al diseñar las obras de drenaje urbano. El establecimiento de este tipo de relaciones se hizo ya en 1932 (Chow, 1988; Dupont y Allen, 2006). Desde entonces, muchos tipos de relaciones se han construido en varias partes del planeta. Sin embargo, tales relaciones no se han construido con precisión en muchos países en desarrollo (Koutsoyiannis et al., 1998), quienes citan que la relación de la i-d-t es una relación matemática entre la intensidad de lluvia (i), la duración (d) y el periodo de retorno (T). Estructuras tales como las presas, que en su gran mayoría se planearon y construyeron décadas atrás, no han contemplado las posibles afectaciones por el cambio climático. Por tal motivo, es necesario realizar un análisis sobre el cambio en los patrones de lluvia, frecuencia de crecidas y entradas a las presas seleccionadas, donde se incluya el posible comportamiento futuro de la precipitación.

Las i-d-T de lluvia, frecuentemente se utilizan en el diseño de obras hidráulicas, tales como las presas. La condición de escorrentía de la lluvia es no estacionaria, tanto por la variabilidad y el cambio del clima, como

por el continuo cambio de uso de suelo. En consecuencia, el cálculo de curvas de frecuencia de i-d-T que considere la no estacionalidad es una tarea compleja y que genera mayor incertidumbre. Sin embargo, estas predicciones se necesitan con urgencia, particularmente conociendo los últimos resultados de las investigaciones que indican que el ciclo del agua se modifica continuamente debido al cambio del clima. En términos de cambio climático, un efecto múltiple (y multiplicativo) se puede esperar debido a que el cambio climático no sólo afecta la distribución de precipitaciones, sino también su intensidad. Además del cálculo de los cambios en las precipitaciones, es necesario cuantificar la incertidumbre en cualquiera de los modelos de predicción empleados.

Resultados

Los criterios de selección de las tres cuencas fueron: a) distribución en la república mexicana (ilustración 1), y b) importancia que tienen por su impacto económico y social. Al sur, en el estado de Chiapas se encuentra la presa más grande de México, La Angostura (ilustración 2), con una capacidad de $10\,727 \times 10^6$ m³, la cual se usa para generar energía eléctrica. Al norte, en Chihuahua, se encuentra el río Conchos, que alimenta en gran medida a la presa de La Boquilla (ilustración 3), con una capacidad de $2\,903 \times 10^6$ m³. Por último, al centro del país, el río Cutzamala afluente del río Balsas, perteneciente al sistema Cutzamala que se utiliza para la distribución de agua dulce a la población e industria de la Ciudad de México y del Estado de México, alimenta a la presa Valle de Bravo, con capacidad de 418×10^6 m³ (ilustración 4).

Las precipitaciones diarias fueron extraídas de la base de datos Clicom (clima computarizado). Las estaciones climatológicas se seleccionaron para toda la región dentro de la cuenca en observación (ilustraciones 2, 3, 4). En estos datos, se verificó el rango de años disponibles para cada estación y su ubicación geográfica.

Con los datos de precipitación diaria, se buscaron los datos máximos de cada año para el periodo 1960-1999. Para ello, se buscaron los años válidos. Se consideró un año válido, aquel que contuviera por lo menos trescientos días de datos; esto con la finalidad de asegurar la captura de los periodos de lluvia de la cuenca.

Para los valores extremos de precipitación, en este estudio se utilizó la función de distribución de probabilidad de Gumbel. Con estos datos, se calcularon los parámetros utilizados por la función de distribución de Gumbel, μ (moda) y α (parámetro de escala). Con la función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulada, se calcularon los periodos de retorno.

Con la finalidad de entender y evaluar los efectos de estos cambios en el planeta y en sus formas vivientes, el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) generó escenarios de cambio climático (IPCC, 2000) y se actualizaron considerando los forzamientos radiativos ante la presencia de diferentes gases de efecto de invernadero (IPCC, 2007). Los escenarios RCP (representative concentration pathways) contienen emisiones, concentraciones, cambio de uso de suelo y cambios en variables ambientales y biogeoquímicas para el siglo XXI (Moss et al., 2010).

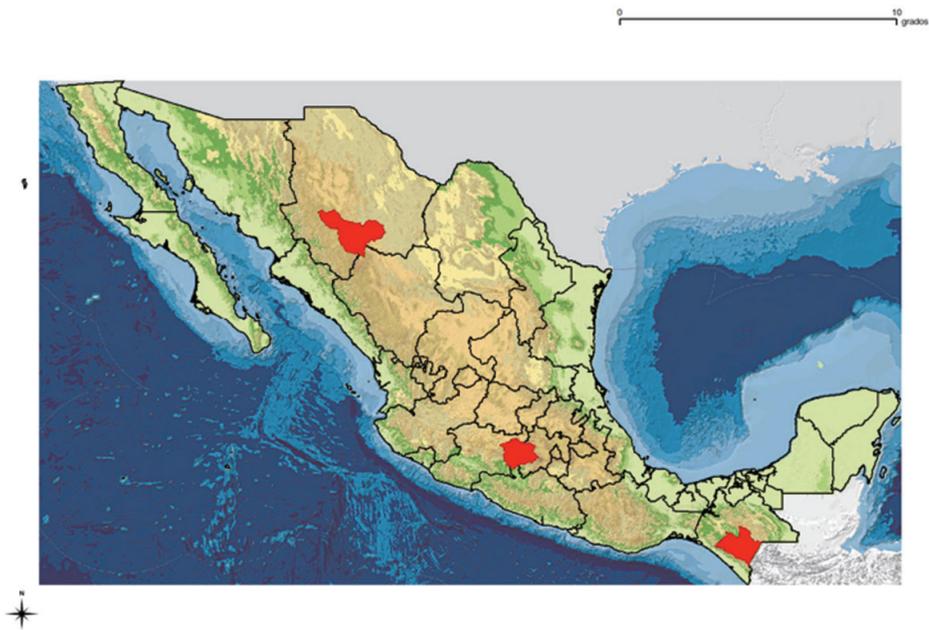


Ilustración 1. Cuencas seleccionadas. Mapa de la de la república mexicana: en líneas negras la división política. Las áreas en rojo muestran la ubicación de: a) al norte, Cuenca río Conchos 1, b) al centro, cuenca Cutzamala y c) al sur, subregión hidrológica Grijalva-La Concordia.

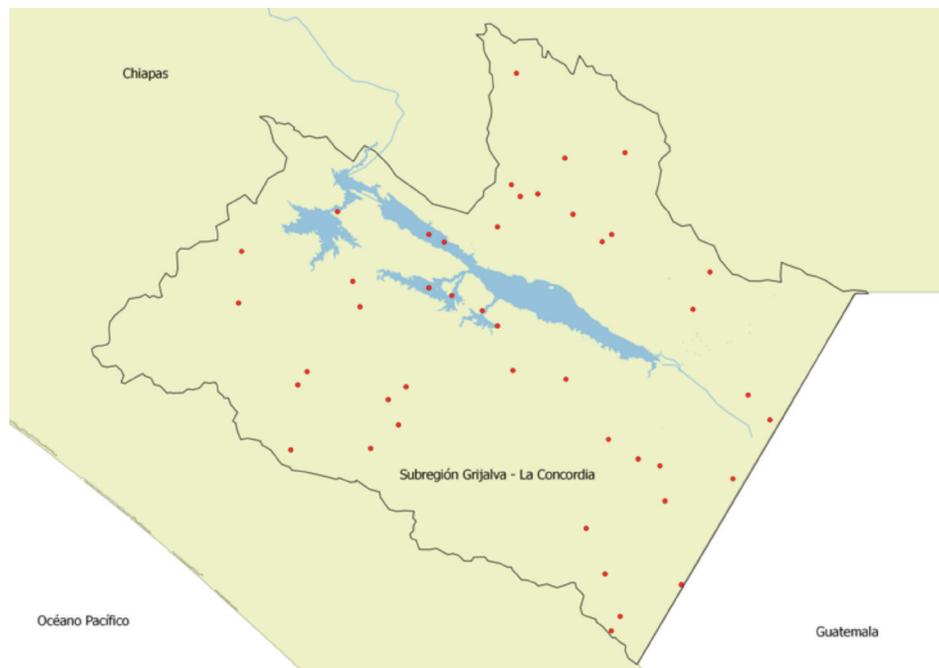


Ilustración 2. Localización de las estaciones climatológicas y la presa La Angostura de la subregión Grijalva-La Concordia. Los puntos rojos representan la localización de las estaciones.

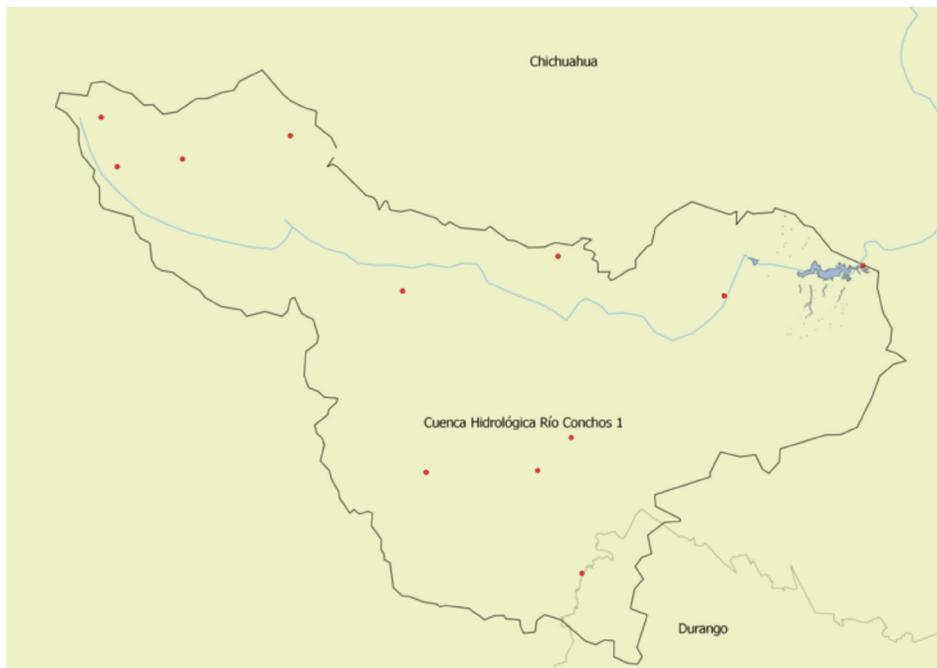


Ilustración 3. Localización de las estaciones climatológicas y la presa La Boquilla de la cuenca hidrológica Conchos 1. Los puntos rojos representan la localización de las estaciones.

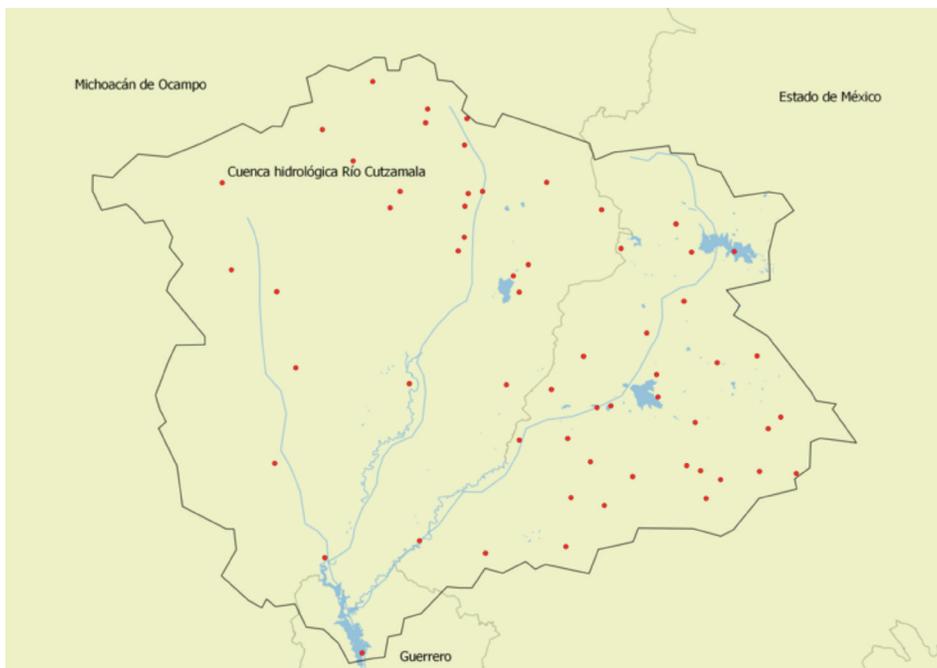


Ilustración 4. Localización de las estaciones climatológicas de la cuenca hidrológica Cutzamala. Los puntos rojos representan la localización de las estaciones.

Se seleccionaron dos modelos de circulación general del experimento CMIP5 (proyecto de intercomparación de modelos acoplados, fase cinco) (Taylor et al., 2011). Uno de los criterios importantes en la selección de los modelos fue que tuvieran precipitaciones diarias con alta o media resolución espacial. Los modelos seleccionados fueron el MPI-ESM_LR (Max Planck Institute for Meteorology, Earth System Model, Low Resolution, Alemania) y el MRI_CGCM3 (Meteorological Research Institute, Coupled General Circulation Model Version 3, Japón).

Para conocer la tendencia a futuro, se calculó el porcentaje de cambio usando los modelos de acuerdo con la tabla 1. Para

ello, se usaron precipitaciones máximas de fechas históricas (1960-1999) y futuras (2060-2099) de cuarenta años de los datos del modelo. Para incluir los escenarios futuros en los datos de precipitación, se multiplicó cada uno de los cocientes a los datos de precipitación máxima, de las estaciones correspondientes a cada cuenca. La subregión Grijalva-La Concordia muestra el mayor incremento en las precipitaciones máximas en la mayoría de los modelos presentados. La cuenca Cutzamala es la que presenta menor cambio (8% en promedio) en la mayoría de los modelos. Con los escenarios planteados, la cuenca río Conchos 1 muestra un incremento en la precipitación máxima del 13%, en promedio (tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de cambio calculado de los datos de los históricos de 1960 a 1999 y los datos del modelo de 2060 al 2099.

Cuenca	Modelo	Experimento	Ensamble	Cociente	Porcentaje
Conchos	MPI-ESM-LR	rcp45	r3i1p1	1.2961	29.61
		rcp85		1.11	11
	MRI-CGCM3	rcp45	r1i1p1	1.0912	9.12
		rcp85		1.0162	1.62
Concordia	MPI-ESM-LR	rcp45	r3i1p1	1.0788	7.88
		rcp85		1.2267	22.67
	MRI-CGCM3	rcp45	r1i1p1	1.5943	59.43
		rcp85		2.1498	114.98
Cutzamala	MPI-ESM-LR	rcp45	r3i1p1	1.0673	6.73
		rcp85		1.0339	3.39
	MRI-CGCM3	rcp45	r1i1p1	1.0655	6.55
		rcp85		1.1716	17.16

Con estos cálculos, se obtuvieron los parámetros de la función de probabilidad de Gumbel, para cada cuenca. Posteriormente, fueron calculados los periodos de retorno. Como es de esperarse, la subregión Grijalva-La Concordia muestra el mayor incremento en las isoyetas tanto en el periodo de retorno de diez años como de cien años (no mostrado). Las isoyetas en la subregión hidrológica mencionada anteriormente tienen máximos de 350 mm/24 h y de 500 mm/24 h, para periodos de retorno de diez y cien años, respectivamente, con el modelo MRI-CGCM3, experimento rcp8.5.

Para obtener las curvas i-d-T se consideraron los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50

y 100 años, y una duración de 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 minutos. Se calculó el promedio ponderado, usando polígonos de Voronoi, de cada periodo de retorno calculado en cada cuenca. El cálculo de las intensidades de la precipitación para distintas duraciones y periodos de retorno fue realizado con la fórmula de Chen (Chen y Ace, 1983).

Para la cuenca hidrológica río Conchos 1, en términos generales, se observa un decremento de la intensidad en los modelos (ilustraciones 5, 6, 7). Este decremento es más notorio con duraciones de la precipitación menores a una hora. En el modelo MRI-CGCM3 RCP 8.5 hay un aumento en la intensidad de la lluvia (ilustración 8).

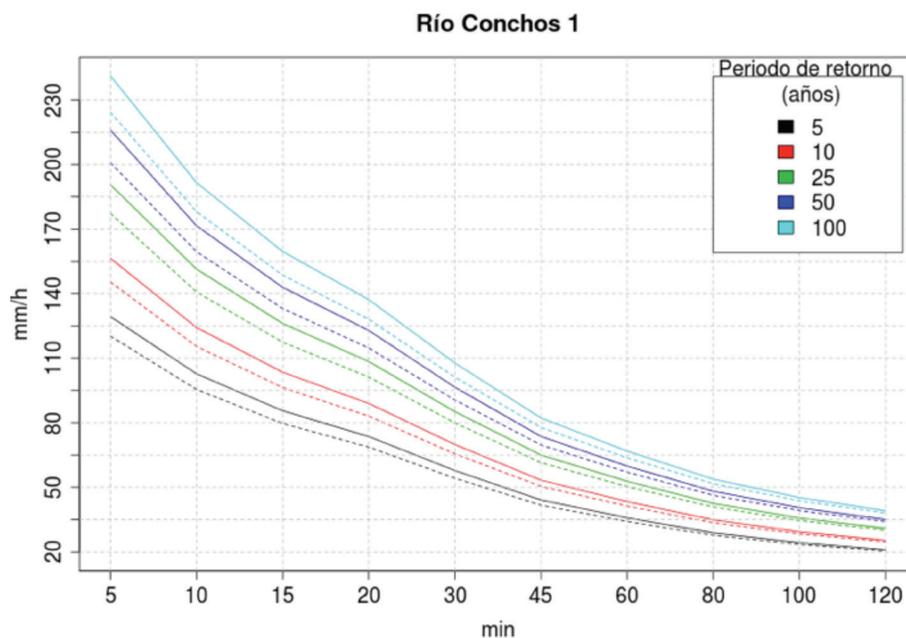


Ilustración 5. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Conchos 1. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MPI-ESM-LR RCP 4.5.

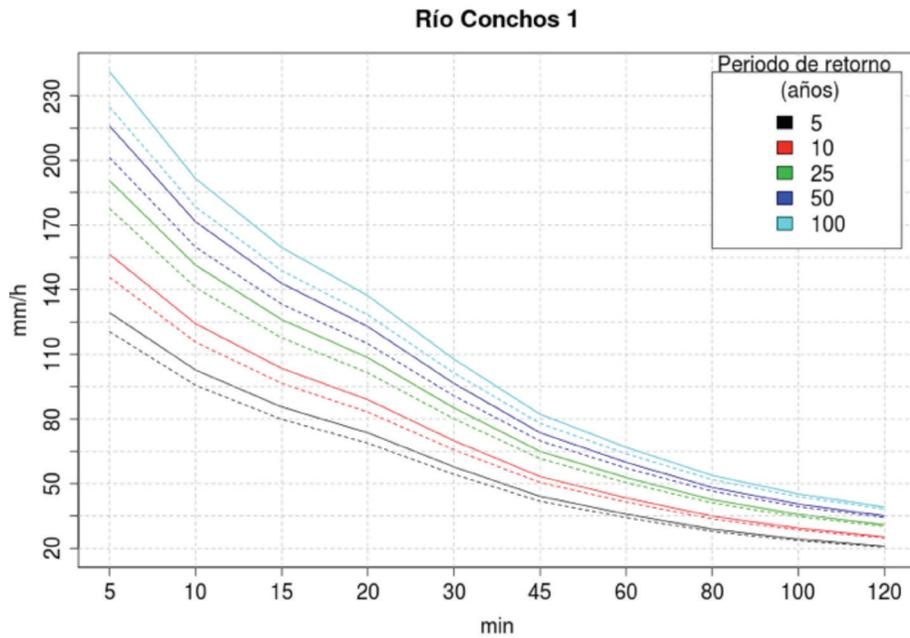


Ilustración 6. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Conchos 1. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5.

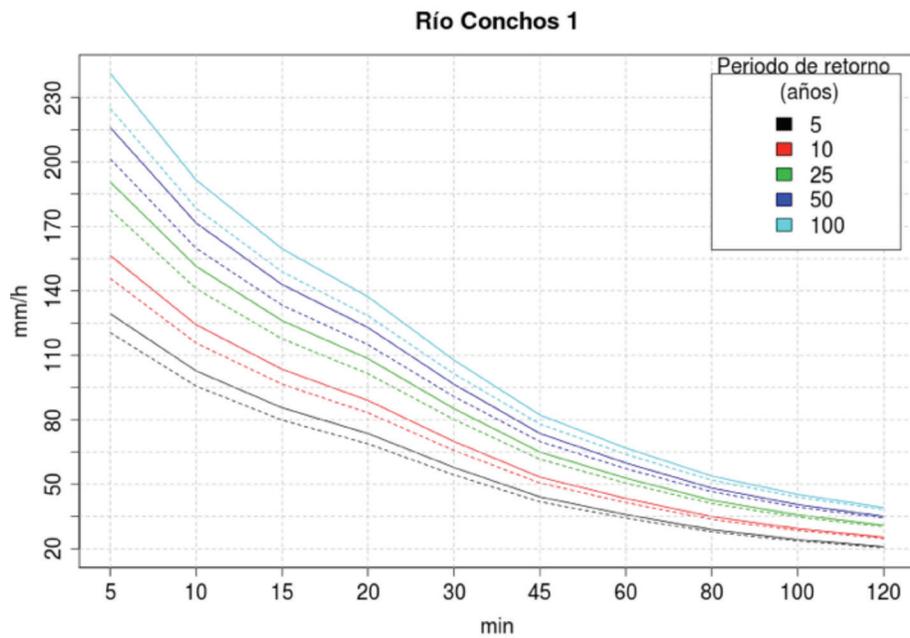


Ilustración 7. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Conchos 1. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MRI-CGCM3 RCP 4.5.

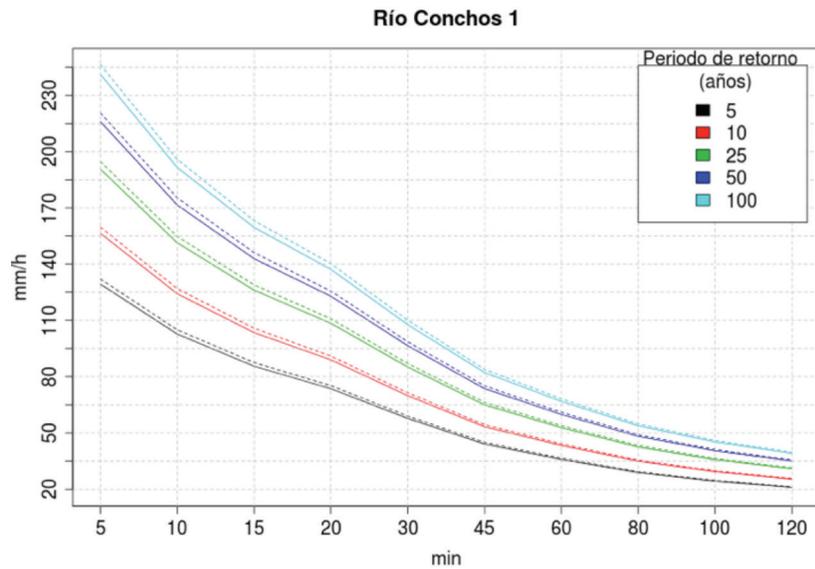


Ilustración 8. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Conchos 1. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MRI-CGCM3 RCP 8.5.

En la cuenca Cutzamala, en todos los modelos analizados hay un ligero incremento en la intensidad de precipitación para cualquier duración de lluvia (ilustraciones 9-12). Sin embargo, en el modelo MRI-CGCM3 RCP 8.5 este incremento es más pronunciado (ilustración 12).

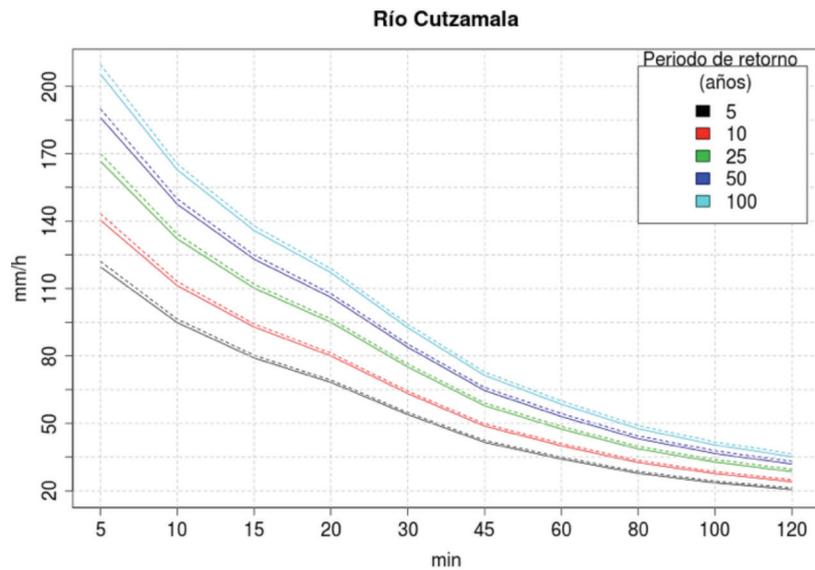


Ilustración 9. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Cutzamala. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MPI-ESM-LR RCP 4.5.

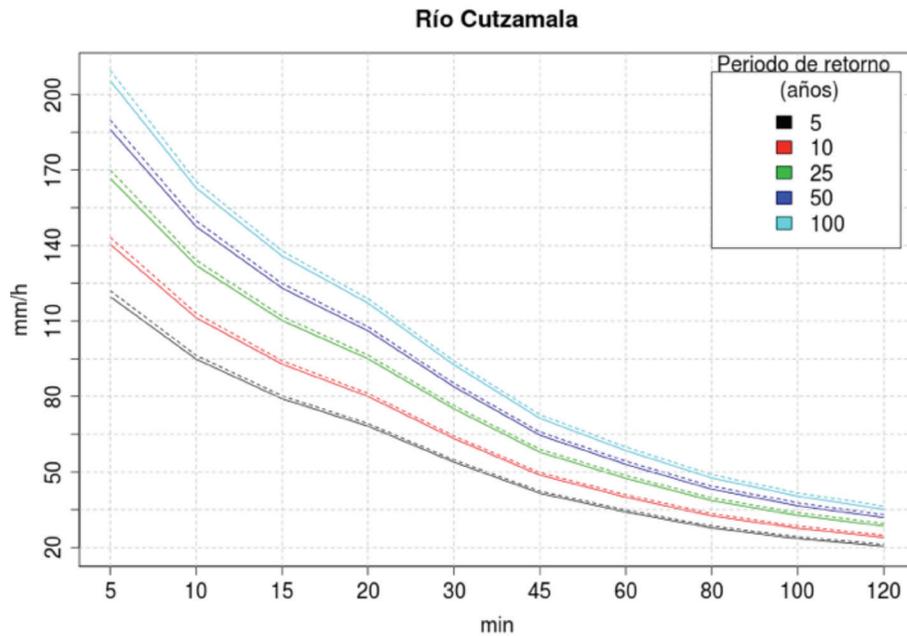


Ilustración 10. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Cutzamala. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MRI-CGCM3 RCP 4.5.

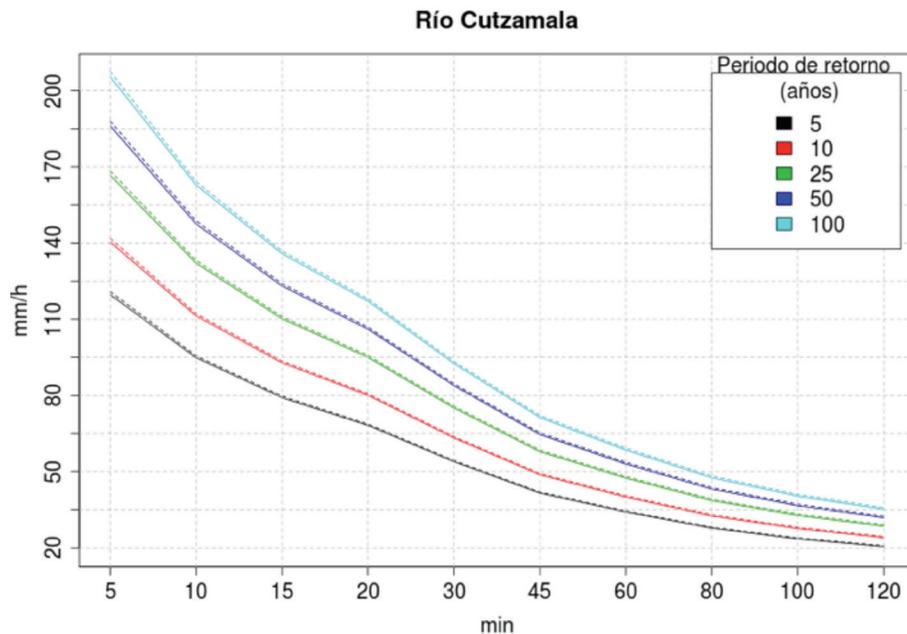


Ilustración 11. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Cutzamala. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5.



Ilustración 12. Curvas i-d-T para la cuenca hidrológica río Cutzamala. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MRI-CGCM3 RCP 8.5.

En la subregión Grijalva-La Concordia, los cuatro experimentos numéricos presentan un decremento en la intensidad de la precipitación (ilustraciones 13-16). El decremento es más pronunciado en las lluvias con duraciones menores a una hora. Esta condición es muy evidente en los experimentos de MPI-ESM-LR RCP 8.5, MRI-

CGCM3 RCP 4.5 y MPI-CGCM3 RCP 8.5. Sin embargo, en el experimento MRI-CGCM3 RCP 8.5 existe un cruce en las curvas i-d-T en las precipitaciones con duración de 60 minutos; es decir, que a lluvias con duraciones mayores de una hora, la intensidad de la precipitación en los modelos (futuro) es superior a la de las observaciones.

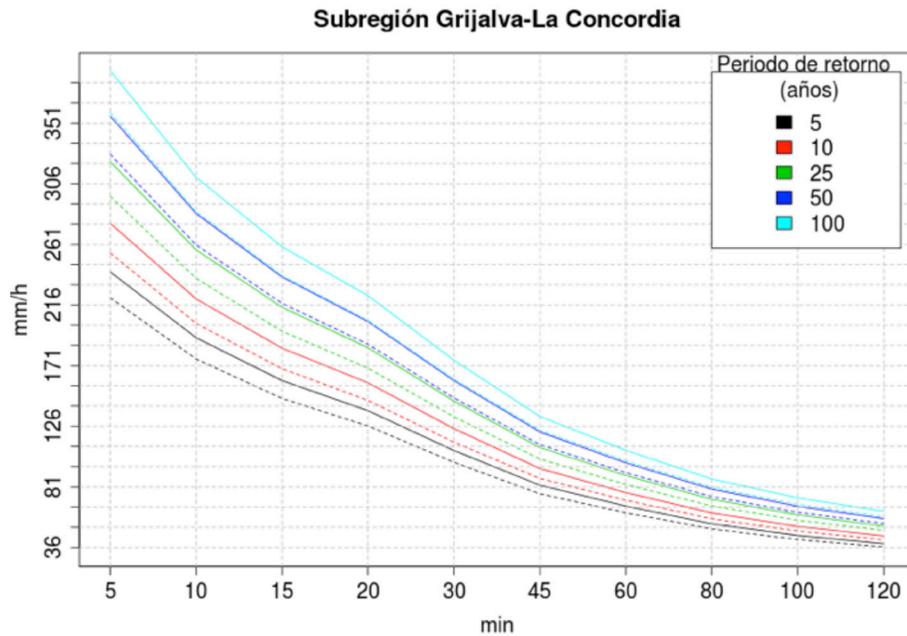


Ilustración 13. Curvas i-d-T para la subregión hidrológica Grijalva-La Concordia. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MPI-ESM-LR RCP 4.5.

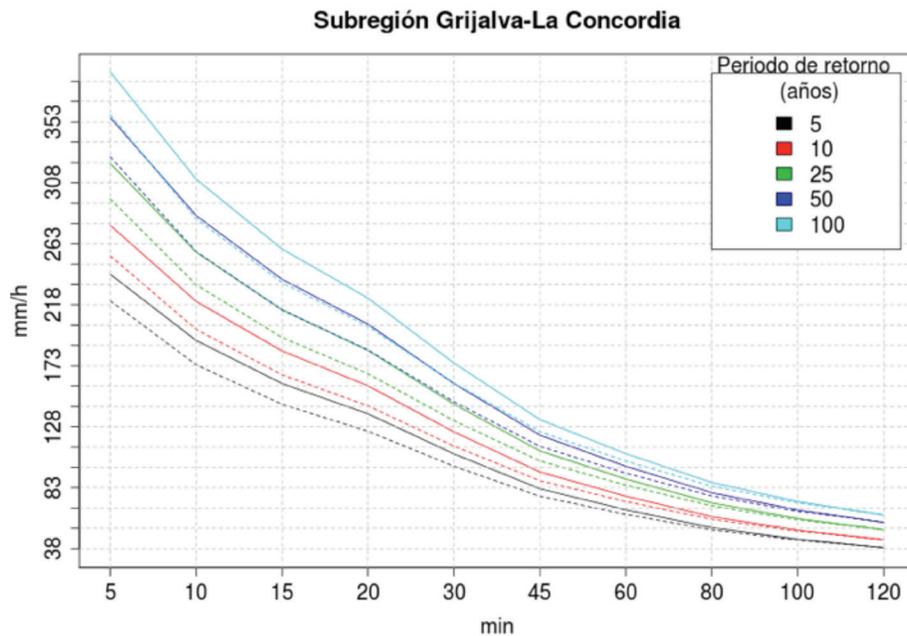


Ilustración 14. Curvas i-d-T para la subregión hidrológica Grijalva-La Concordia. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MRI-CGCM₃ RCP 4.5.

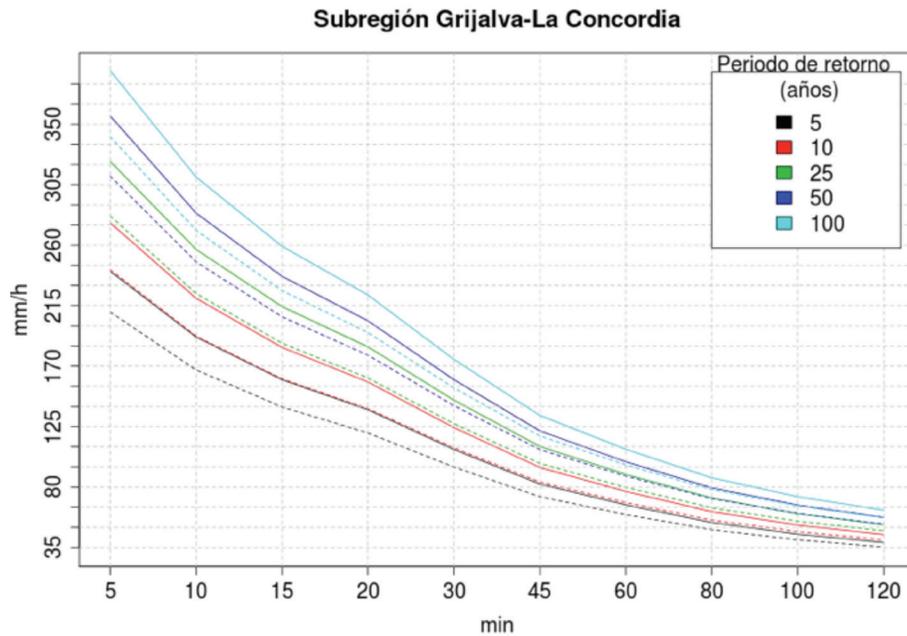


Ilustración 15. Curvas i-d-T para la subregión hidrológica Grijalva-La Concordia. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5.

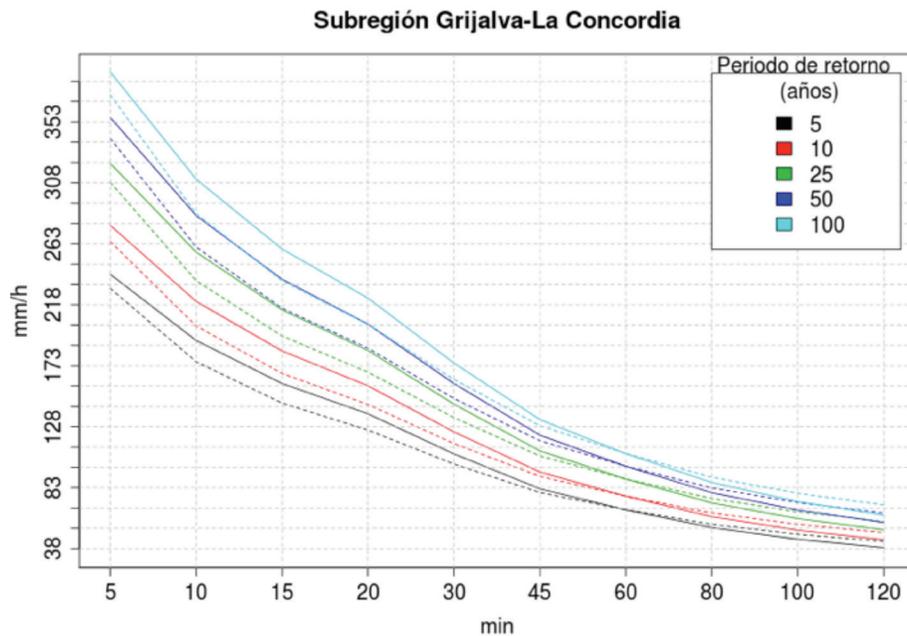


Ilustración 16. Curvas i-d-T para la subregión hidrológica Grijalva-La Concordia. La línea sólida es la intensidad de las estaciones y la línea punteada es la intensidad aplicando el porcentaje de cambio del modelo MRI-CGCM₃ RCP 8.5.

El cálculo del error (RMSE), en todos los casos, es inferior a la precipitación media (no mostrado); sin embargo, existe una gran variación del error entre las estaciones. Por otra parte, las correlaciones también son muy variadas dentro de la misma cuenca; hay casos que están muy correlacionados (0.9) y otros casos dentro de la misma cuenca con correlaciones cercanas a cero. Pero, en general, existe una mayor correlación con el modelo de MRI. Esta característica se puede deber a que el modelo MRI tiene mayor resolución espacial.

Conclusiones

Con las precipitaciones máximas anuales, de los datos de los modelos, se calculó el porcentaje de cambio y se halló un aumento en la precipitación en las tres cuencas. Se encontró que la subregión Grijalva-La Concordia es la que presenta un mayor cambio, 51% en promedio, seguido de las cuencas río Conchos 1 (13%) y Cutzamala (8%).

En la cuenca río Conchos 1, la tendencia en general es un decremento de las lluvias, exceptuando para el modelo MRI experimento RCP 8.5, donde se incrementa la intensidad de precipitación. Para las duraciones de 60 a 120 minutos, el decremento de la precipitación es menor. Esto indica una probabilidad de tener una disminución en la aportación de agua a la cuenca para los próximos años debido a las precipitaciones máximas. En la cuenca río Cutzamala, la precipitación se incrementa en todos los modelos, pero en el modelo MRI-CGCM3 RCP 8.5 este incremento es más pronunciado que el resto. En la subregión Grijalva-La Concordia se observa que la precipitación tiene un decremento.

Para el experimento RCP 8.5, a partir de la duración de 60 minutos, la intensidad de lluvia se incrementa.

Bibliografía

- Cheng-Lung, Chen, Asce, M. (1983). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas. *J. Hydraulics Eng.* 109, 1603-1621.
- Chow, V. T. (1988). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book.
- Dupont, B. S. & Allen, D. L. (2000). Revision of the Rainfall Intensity Duration Curves for the Commonwealth of Kentucky. Kentucky: Kentucky Transportation Center, College of Engineering, University of Kentucky.
- _____ (2006). *Establishment of Intensity-Duration-Frequency Curves for Precipitation in the Monsoon Area of Vietnam*. Kentucky: Kentucky Transportation Center, College of Engineer, University of Kentucky in corporation with US Department of Transportation.
- IPCC SRES (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nakićenović, N. & Swart, R. (Eds.), Cambridge University Press. Recuperado de: <http://www.grida.no/publications/other/ipcc%5Fsr/?src=/climate/ipcc/emission/978-052180081-5> (pb: 0-521-80493-0, 978-052180493-6).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *The Fourth Assessment Report*. Recuperado de: www.ipcc.ch
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, A. & Manetas, A. (1998). Mathematical Framework for Studying Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationships. *J. Hydrol.*, 206, 118-135.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T. Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. & Wilbanks, T. J. (2010). The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, vol. 463, 747-756.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. (2011). A Summary of the CMIP5 Experiment Design. Submitted to *Bulletin of the American Meteorological Society*.

Resumen curricular

Efraín Mateos Farfán. Licenciatura en Oceanología, maestría en Ciencias (Oceanografía Física) y doctorado en Oceanografía Física. Líneas de investigación: dinámica de costas y bahías, modelación numérica del océano, interacción océano atmósfera.

Julio Sergio Santana Sepúlveda. Licenciatura en Ingeniería Civil, maestría en Sistemas Computacionales y doctorado en

Ciencias de la Computación. Líneas de investigación: integración de sistemas computacionales y de información para manejo de datos numéricos, sistemas computacionales y de información aplicados a la ingeniería e ingeniería artificial: procesamiento de lenguaje natural y procesamiento de lenguajes gráficos.

Martín José Montero Martínez. Licenciatura en Física, maestría en Ciencias (Geofísica), doctorado en Ciencias (Ciencias de la Atmósfera) y posdoctorado. Líneas de investigación: cambio climático global y regional, reducción de escala de modelos climáticos, climatología de tormentas, efectos aerosol-clima y vegetación clima, percepción remota aplicada a detección de fuegos.

Iván Rivas Acosta. Licenciatura en Ingeniería Civil, maestría y doctorado en Planeación de Recursos Hidráulicos. Líneas de investigación: modelación lluvia-escurrimiento, drenaje urbano, hidráulica fluvial, sistemas de información geográfica, cambio climático y modelos de optimización.

SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN CHERÁN, MICHOACÁN

E. O. Cervantes, D. S. Hernández, M. A. Córdova, S. Vázquez e I. Hernández

Resumen

La comunidad de Cherán, Michoacán, México, cabecera municipal que lleva el mismo nombre, se encuentra ubicada en la región de la meseta purépecha al pie del Eje Volcánico y se caracteriza por ser una región con fuerte presencia de la población indígena.

Cherán se abastece de agua subterránea de un pozo que se encuentra a una profundidad de 180 metros; el agua recorre 5 km del pozo hasta un tanque de regulación que abastece por gravedad a la localidad. El costo del consumo de energía eléctrica por el bombeo y rebombeo es alto comparado con los ingresos que tiene la comunidad para sufragar dichos montos, bombeando hacia la localidad entre 12 y 14 horas por día.

Como alternativa viable para aumentar la dotación de agua a la comunidad y con un costo de mantenimiento y operación reducido, se propuso la instalación de un modelo comunitario para la captación y almacenamiento de agua de lluvia. El Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) contará con un área de captación, sedimentadores y una hoya de almacenamiento de agua.

El sistema de captación y almacenamiento se planteó ubicarlo en el cerro Kokundikata, nombre de origen purépecha que significa “Lugar donde rebota el eco”, para aprovechar la elevación del cerro y así conducir el agua por gravedad para su aprovechamiento y evitar costos de bombeo del agua captada, estimando un aprovechamiento anual de 20 000 metros cúbicos, aproximadamente. En este trabajo se presentan los estudios realizados con el fin de determinar la opción más viable para ubicar el sistema de captación de agua de lluvia. Así también, se indican las dimensiones inicialmente planteadas para el proyecto ejecutivo.

Introducción

Derivado del Plan Estratégico para el Desarrollo Sustentable de Cherán, Michoacán, México, elaborado en 2012 y donde se identificaron 103 proyectos prioritarios, surge el de la instalación de una hoya de captación de agua de lluvia.

El objetivo primordial del proyecto es incrementar la dotación de agua a la comunidad de Cherán, mediante la instalación de infraestructura hidráulica comunitaria para captación y almacenamiento de agua de lluvia.

En este sentido, el costo del consumo de energía eléctrica por bombeos es de aproximadamente \$150 000 mensuales, en promedio, abasteciendo a la comunidad de tal manera que cada barrio de la localidad cuenta con servicio tandeado una vez cada 12 días, aproximadamente.

El diseño del SCALL permitirá que el agua de lluvia sea cosechada en el área de captación, para pasar después a través de los sedimentadores y ser almacenada en la hoya. Una parte del agua de lluvia captada será derivada hacia el tanque de regulación que actualmente tiene la comunidad (en el

cerro Kokundikata), mientras que el resto será entregado al sistema de purificación de agua.

Para la ubicación del sistema existen dos alternativas, de tal forma que se tienen que evaluar la viabilidad de ejecución y el costo de inversión de las dos opciones para seleccionar la mejor.

Una vez seleccionada la alternativa más viable técnica y económicamente, se procedió a realizar el predimensionamiento del sistema en función de las áreas disponibles para el mismo.

Resultados

Propuesta 1 para el SCALL

Como propuesta inicial se consideró instalar la hoya de almacenamiento sobre las laderas del cerro, y el área de captación en el cerro Kokundikata, aprovechando así al máximo las áreas que se tienen en la cima del cerro.

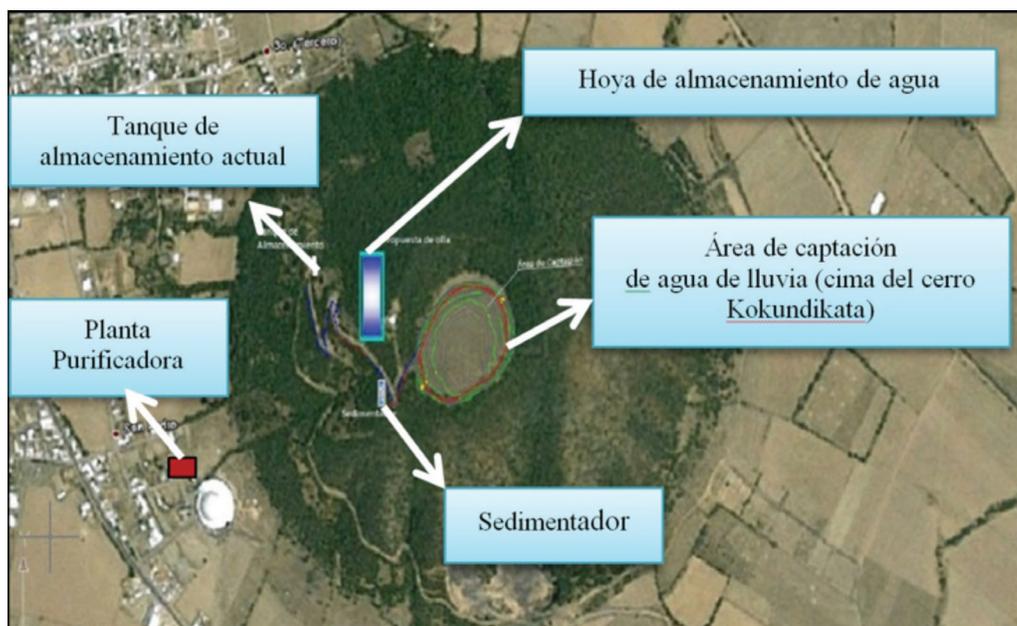


Ilustración 1. Ubicación de los elementos del SCALL para la propuesta 1.

Propuesta 2 para el SCALL

En esta propuesta se consideró utilizar la cima del cerro para el área de captación, los sedimentadores y la hoya de almacenamiento, teniendo el conjunto de infraestructura en un mismo sitio.

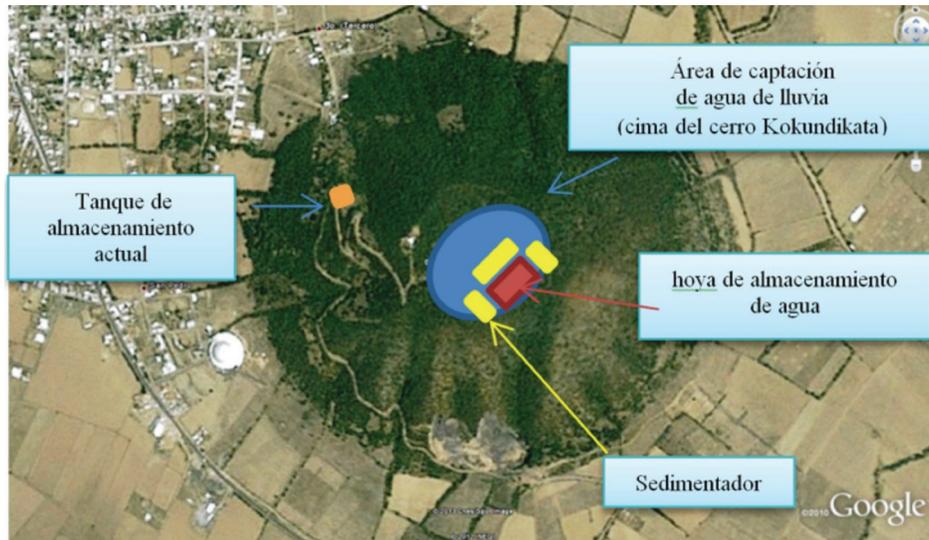


Ilustración 2. Ubicación de los elementos del SCALL para la propuesta 2.

Planteadas las dos propuestas, se procedió a visitar los sitios para determinar de las propiedades del suelo y, con ello, establecer ventajas y desventajas de la instalación del sistema en cada uno de los sitios. Uno de los puntos importantes a observar durante las visitas de campo es el comportamiento del suelo, debido a que estaría sometido a cargas mayores con la hoya de almacenamiento.

Durante los recorridos realizados por la parte oeste del cerro, en busca del lugar adecuado para la instalación, se observaron varias problemáticas que no permitirían la instalación del SCALL conforme se planteó en la primera propuesta.

Los principales problemas observados para la primera propuesta fueron las inclinaciones de los taludes que presenta el terreno. También se apreció que el suelo es muy inestable debido a que está constituido, en mayor porcentaje, por arena volcánica y, en menor proporción, por limos. Por ello, al tener la infiltración del agua, producto de la precipitación pluvial, se generan diferentes planos de falla que provocan deslizamientos en los taludes debido al lavado del limo con la infiltración de la lluvia, lo cual debilita la fuerza de cohesión del suelo.

En las ilustraciones 3 y 4 se muestra la inclinación de los taludes y el deslave que ocurre con los escurrimientos.



Ilustración 3. Composición visual del suelo en taludes del cerro.

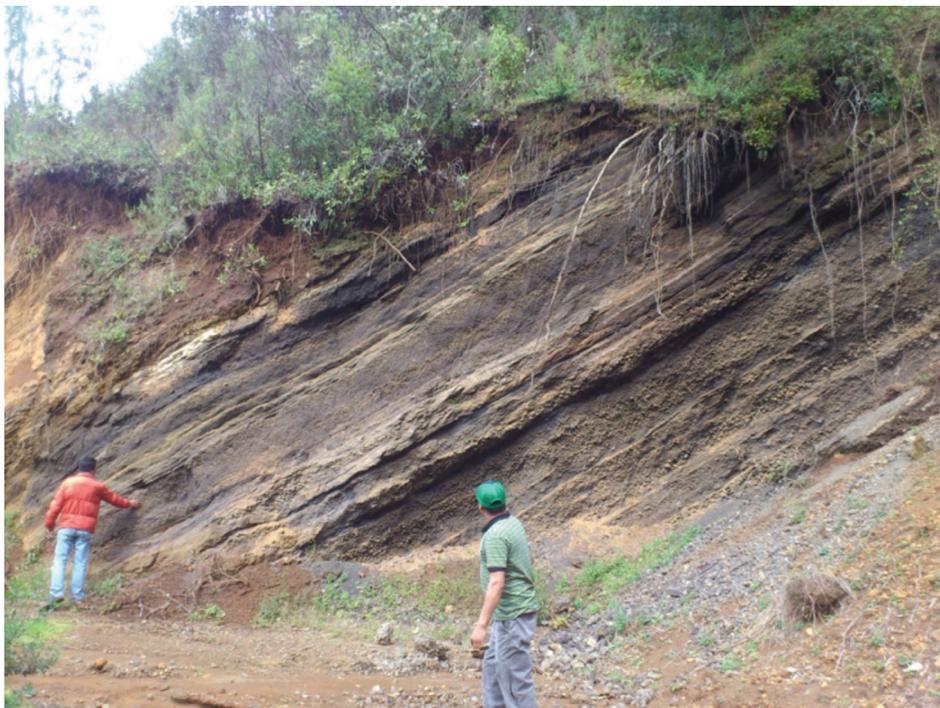


Ilustración 4. Inclinación de los taludes en el cerro; se observan planos de falla.

Estudios geofísicos y propiedades del suelo

El primer estudio consistió en dos líneas de calicata eléctrica o tomografía eléctrica distribuida dentro del terreno, para así determinar las características estratigráficas prevalentes en el subsuelo a una profundidad de 22 m. Mediante el análisis de la morfología de las curvas de resistividad y su representación en el perfil de resistividades aparentes se identificaron las siguientes unidades eléctricas (espesor-resistividad), mostradas en las ilustraciones 5 y 6.

Los valores obtenidos corresponden a estratos de materiales ígneos de tipo extrusivo, obtenidos desde la superficie y hasta una profundidad de 4.50 m. Este material se puede definir como ceniza volcánica. Subyacente a esta ceniza se encuentra una arena de la misma composición litológica,

localizada entre 4.50 y 14 m. En la base de la columna se encuentra muy alterada la roca ígnea extrusiva.

Posteriormente, se efectuaron estudios de extracción de muestras inalteradas, obteniendo como propiedades índice del suelo las presentadas en la tabla 1.

De acuerdo con los resultados de la muestra inalterada, el terreno se compone principalmente por suelos cohesivos en la parte superior y suelos granulares o friccionaltes a mayor profundidad, como son limos inorgánicos de alta y baja compresibilidad (MH, ML), arenas limosas (SM) y fragmentos de roca basáltica vesicular muy porosa, o fragmentos chicos en pequeños porcentajes y grava volumétrica de tezontles o gravas bien y mal graduadas, de compacidad relativa de “compacta” a “muy compacta”.

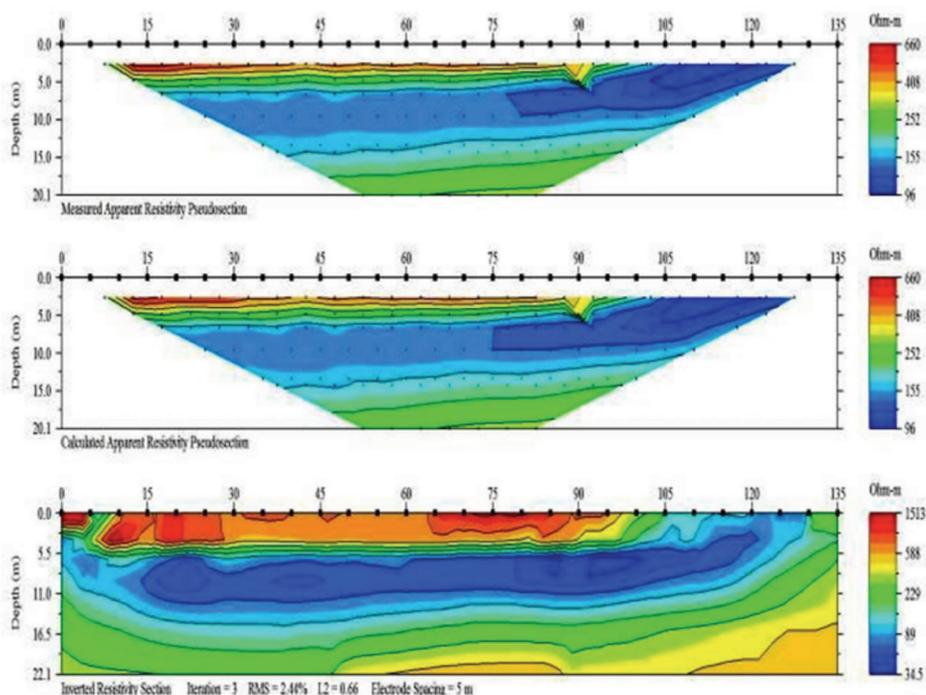


Ilustración 5. Resultados de la línea de calicata eléctrica 1 de la prueba realizada.

A partir de los resultados de las propiedades del suelo, se determinó como opción viable la segunda, debido a que existirían riesgos de falla en taludes por la carga que recibiría el suelo al adoptar la opción 1, en la cual, para atenuar dichos efectos, de acuerdo con los estudios efectuados, sería necesario colocar un reforzamiento de los taludes donde se ubicara la hoya de almacenamiento que, de inicio, ocasionaría un costo importante para la instalación del sistema de captación pluvial.

Predimensionamiento del SCALL

Una vez definida el área donde se ubicaría el sistema, se determinó la precipitación media máxima aprovechable, con base en los registros de precipitaciones en la zona. Solamente se consideraron las precipitaciones mayores a 20 mm, con lo que resultó una precipitación anual media aprovechable de 981 mm en el sitio de instalación del sistema de captación.

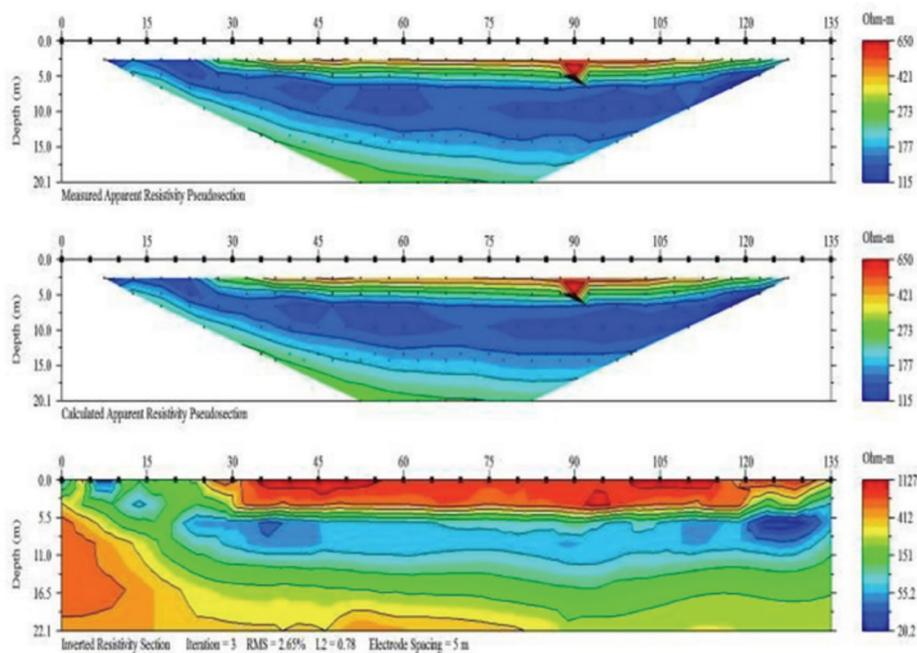


Ilustración 6. Resultados de la línea de calicata eléctrica 2 de la prueba realizada.

Tabla 1. Resultados de propiedades índice del suelo en el sitio.

Muestra	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	γ_m	S.s.	e	W (%)	Gw (%)
1	INAP	INAP	INAP	1.23	2.64	1.90	37.10	50.4
2	87.30	48.81	38.49	1.41	2.67	1.90	55.5	76.2

Con esta precipitación y el área disponible en la cima del cerro, 20 000 m², se tiene un volumen máximo aprovechable de 19 620 m³. De esta manera, las dimensiones estimadas de la hoya de almacenamiento

resultaron: 80 x 50 x 7 m, con un talud $k = 1.43$. Así también, se tiene un área de captación de 16 000 m², aproximadamente. En las ilustraciones 7 y 8 se muestran avances en la instalación del sistema.



Ilustración 7. Excavación para formar la hoya y taludes.



Ilustración 8. Tendido de geotextil para reforzar taludes y fondo de hoya.

Este volumen permitirá dotar agua desde la planta purificadora, por medio de garrafones, a las 3 561 viviendas de la localidad, lo que representa un volumen de 7 578 m³ al año, restando poco más de 12 000 m³ aprovechables para otros usos. Con la venta interna de garrafones, se estima un ingreso anual de poco más de \$3.9 millones, considerando un precio de venta de \$10.00 por unidad, lo que permitirá sufragar los gastos de mantenimiento del sistema de captación pluvial, los gastos de energía eléctrica anual del pozo profundo y contar con un fondo para mejoramiento de la infraestructura de agua potable en la localidad, de tal manera que el sistema sea autosuficiente.

Conclusiones y recomendaciones

Actualmente, se está en el proceso de instalación del SCALL en la comunidad de Cherán, Michoacán. Con este sistema se considera posible cubrir las necesidades de abastecimiento de agua envasada en garrafones para la comunidad durante todo el año, de tal manera que con los ingresos que se recauden con la purificación de agua envasada, se cubran tanto los gastos de mantenimiento del SCALL y la purificadora como los gastos que genera el bombeo del agua a la localidad. Así también, contar con fondos para el mejoramiento en el sistema de abastecimiento de agua a la localidad.

Bibliografía

- Rico, Alfonso (2008). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México: Ed. Limusa.
- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Laboratorio de Materiales (2014). *Informe del estudio geotécnico:*

Hoya de almacenamiento de agua en zona del cráter, sitio Kukundikata, México.

Resumen curricular

Erick O. Cervantes Gutiérrez. Ingeniero civil (2005) y maestro en Ingeniería, en el área “Infraestructura del transporte en la rama de las vías terrestres” (2010), por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Especialista en hidráulica desde 2012. Desarrolla proyectos de tecnologías apropiadas en materia de agua y saneamiento para comunidades rurales y procesos de instalación de sistemas de captación pluvial.

Dante S. Hernández Padrón. Ingeniero civil por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (2004) y maestro en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México, en el área “Hidráulica” (2009). Especialista en hidráulica desde 2010. Desarrolla proyectos de tecnologías apropiadas en materia de agua y saneamiento para comunidades rurales, sistemas de redes de agua potable en comunidades rurales y diseño hidráulico de sistemas de humedales para tratamiento de aguas residuales.

Miguel Ángel Córdova Rodríguez. Ingeniero bioquímico por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (1994). Subcoordinador de Tecnología Apropiada. Desarrolla proyectos sobre adaptación y transferencia de tecnologías apropiadas en materia de agua y saneamiento para comunidades rurales, marginadas e indígenas. Coordinación técnica de planes estratégicos para recuperación de cuencas.

Sandra Vázquez Villanueva. Ingeniera industrial en Química por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (1991) y maestra en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México en la rama “Ambiental” (1999). Especialista en hidráulica desde 2009. Desarrolla proyectos de diseño, adaptación y transferencia de tecnologías apropiadas en materia de agua y saneamiento en comunidades rurales, marginadas e indígenas. Diseño de modelo de casa ecológica autosuficiente. Planes estratégicos para recuperación de cuencas.

María Isabel Hernández Vivar. Ingeniera industrial en Química por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (1983). Créditos cubiertos de maestría en Calidad por la Universidad La Salle (1995). Especialista en hidráulica desde 1990. Auditora en sistemas de calidad y participante en proyectos de tecnologías apropiadas en materia de agua y saneamiento en comunidades rurales.

DISEÑO DE ESQUEMAS DE REMEDIACIÓN DE UN ACUÍFERO GRANULAR-FRACTURADO CONTAMINADO POR CROMO

C. Gutiérrez, A. Martín, M. Martínez, S. Pérez, I. Villegas, S. Garrido, C. Calderón, S. Gelover y J. García

Resumen

Este trabajo presenta los resultados de un estudio de esquemas de remediación de un acuífero contaminado por cromo, principalmente con Cr(VI).

En ambientes acuáticos el cromo se encuentra presente, en especial, en dos estados de oxidación: hexavalente Cr(VI) y trivalente Cr(III). En general, las sales de Cr(VI) son más solubles que las de Cr(III), lo que lo hace más móvil. El Cr(VI) es la forma más tóxica para microorganismos, plantas, animales y humanos. Debido a los riesgos a la salud por la presencia de este elemento en el agua de bebida, su concentración límite está regulada por la NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el año 2000) a un valor de 0.05 mg /L de cromo total. Por lo tanto, se hace imperativa la remediación de los sistemas contaminados con este metal.

Como parte del estudio, se determinaron la distribución tridimensional de las unidades hidrogeológicas de la zona mediante la información de cortes litológicos y son-

deos geofísicos, así como parámetros hidráulicos mediante la reinterpretación de pruebas de bombeo. Esta información se integró en un modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico y se llevó a un modelo numérico que se calibró y validó.

Asimismo, se efectuaron pruebas de tratabilidad a nivel piloto y en sitio para evaluarlas técnica y económicamente. Las tecnologías están basadas en la reducción del Cr(VI) a Cr(III) por el Fe(II) cuando se oxida a Fe(III), el cual rápidamente forma hidróxido férrico. En consecuencia, el Cr(III) es adsorbido y/o coprecipitado por el hidróxido férrico. Los tratamientos variaron de acuerdo con el origen del Fe(II) dosificado y a las operaciones unitarias acopladas para la separación de los hidróxidos metálicos que contenían el cromo precipitado. Las posibilidades de tratamiento pueden implementarse en acuíferos contaminados con cromo con concentraciones hasta de 600 mg/L, con la factibilidad de que el agua producto pueda destinarse para uso y consumo humano, recarga de acuíferos, disposición en alcantarillado o en bienes nacionales, como agua de riego. Las tecno-

logías propuestas podrían implementarse para la limpieza de la pluma y la fuente de contaminación, con costos de operación y mantenimiento entre 0.74 \$/m³ y 88.64 \$/m³, dependiendo de la concentración del cromo en el agua extraída y la calidad del agua producto requerida.

Para efectuar la remediación del acuífero, se planteó la extracción del agua de la zona problemática bajo distintos escenarios y tratarla mediante tecnología apropiada para remover el cromo e inyectarla al mismo acuífero o intercambiarla con usuarios de la zona.

Introducción

La contaminación en el mundo comienza a ser cada vez más severa. El agua es una de las necesidades básicas para el sostenimiento de la vida. Con los procesos de industrialización y urbanización el uso del agua se ha multiplicado. De acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud, más de 2 000 millones de personas en el mundo no tienen acceso al agua y el 40% no cuenta con servicios de saneamiento básicos.

Las actividades industriales y urbanas han propiciado el incremento en las concentraciones de una gran cantidad de contaminantes en agua subterránea, afectando la salud de millones de personas alrededor del mundo. Así pues, la remediación y tratamiento del agua son de suma importancia.

El cromo se encuentra de forma natural en las rocas de cromita (FeCr₂O₄), crocoíta (PbCrO₄) y óxido crómico (Cr₃O₂); también está presente en el suelo, polvo y gases volcánicos. En fuentes de abasteci-

miento, sean subterráneas o superficiales, su presencia por causas antropogénicas se debe principalmente a las descargas de residuos de industrias de electroplateado, curtiduría, pinturas y textiles, entre otras.

Durante los estudios de factibilidad de remediación de un acuífero debe considerarse la integración de información en cuestiones de origen de la contaminación, estudios de hidrogeología, calidad del agua y parámetros hidráulicos, entre otros; así como valerse de herramientas de modelación y de técnicas de tratamiento que puedan implementarse de manera conjunta con el objetivo de diseñar planes de remediación factibles, con miras a la implementación de aquel que se sea técnica y económicamente viable.

Resultados

La distribución de la conductividad hidráulica horizontal utilizada en el modelo se dedujo, en primera instancia, a partir de la interpretación (Theis, Neuman y recuperación de Theis) de las 25 pruebas de bombeo reinterpretadas en igual número de pozos ubicados dentro del acuífero. Los valores de conductividad hidráulica varían de 1.29 x 10⁻⁴ a 2.5 x 10⁻⁷ metros por segundo.

Se identificó una secuencia estratigráfica de rocas intermedias y depósitos piroclásticos en la zona. Por otro lado, cuatro perforaciones de núcleo continuo indican la presencia de depósitos de material volcánico (piroclásticos), alternándose con rocas de diferente composición, tales como riolitas (rocas ácidas), andesitas (rocas intermedias) y basaltos (rocas básicas) (ilustración 1).

Se realizó la integración de treinta sondeos eléctricos verticales (SEV) de la zona de Tultitlán, Estado de México, para representar la distribución tridimensional de las unidades hidrogeológicas en el subsuelo (ilustración 2).

Se estableció un modelo conceptual de funcionamiento de la zona. Este modelo conceptual se llevó a un modelo numérico basado en la plataforma Visual Modflow. El modelo resultante consta de un dominio de 6 por 7 km con celdas de dimensiones variables y en la dirección vertical ocho capas de espesor variable, de tal suerte que se representara la variación observada. El modelo de transporte se realizó mediante el código MT3D, que se acopla a través de las cargas hidráulicas al modelo de flujo. Se realizó la calibración del modelo de flujo para el perio-

do 1970-2014 y el modelo de transporte con información de concentraciones de cromo para el periodo 1976-2014 (ilustración 3). Se obtuvo una calibración con un error cuadrático medio de 1.4 metros.

Para efectuar la remediación del acuífero se planteó extraer, mediante pozos, el agua de la zona problemática, tratarla mediante tecnología apropiada para remover cromo e inyectar el agua ya tratada al mismo acuífero o intercambiarla con usuarios de la zona. Lo anterior, con base en un modelo de flujo y otro de transporte calibrados que integran toda la información hidrogeológica. Los esquemas de extracción e inyección analizados se presentan en la tabla 1.

A partir de las distintas pruebas en sitio que el IMTA ha efectuado en un acuífero

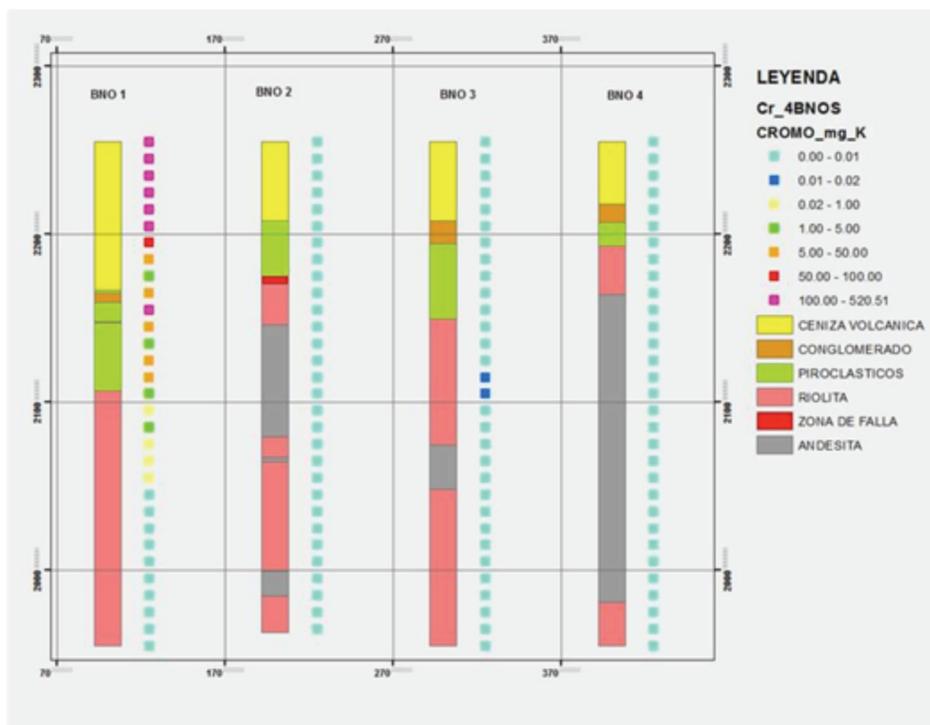


Ilustración 1. Columnas estratigráficas de la zona de estudio.

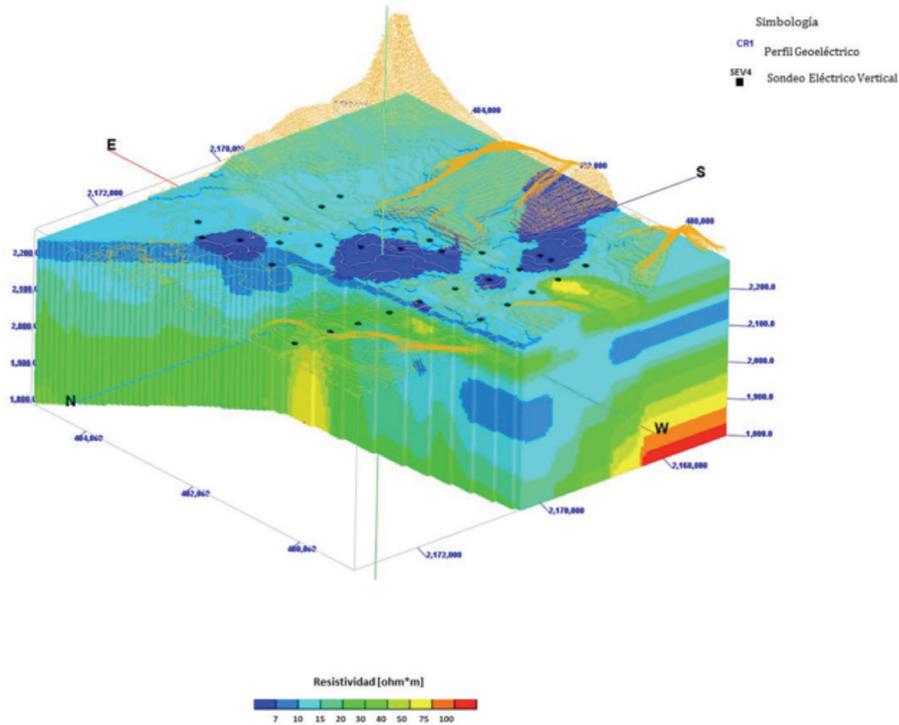


Ilustración 2. Distribución tridimensional de las unidades geoelectricas.

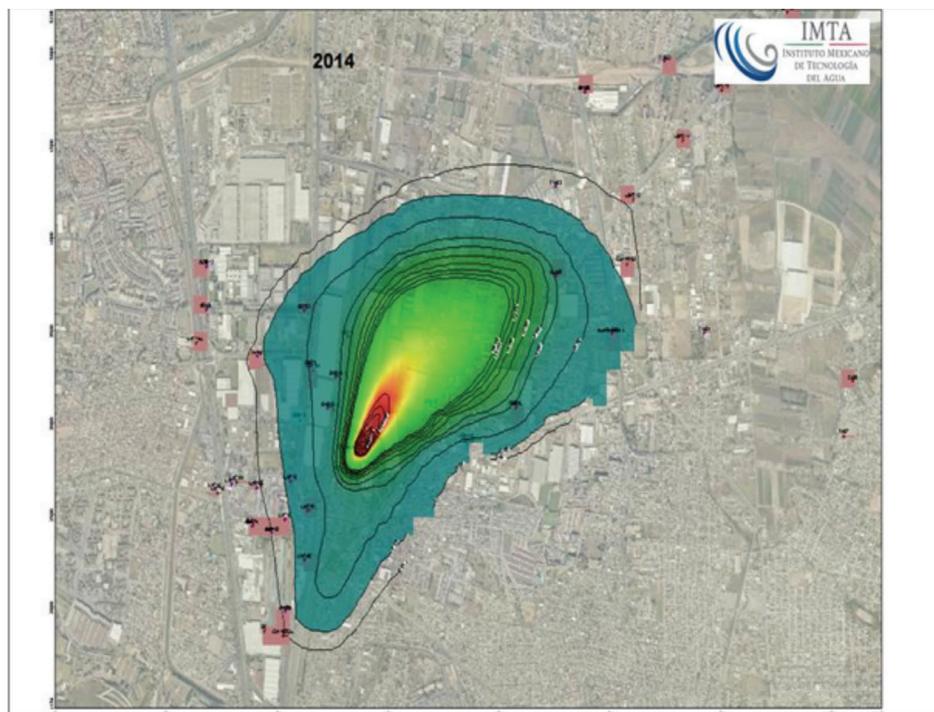


Ilustración 3. Distribución del cromo.

contaminado con cromo, se han podido estimar costos de tratamiento y se ha hecho un esfuerzo para estimar el costo de inversión para la implementación de tales tecnologías, mismo que deberá confirmarse con la realización de un proyecto ejecutivo ad hoc a la situación.

En la ilustración 4 se presentan las alternativas de tratamiento ex situ que el IMTA propone para remediar acuíferos contaminados hasta con 600 mg/L de cromo, seleccionables de acuerdo con el nivel de contaminación y a la concentración requerida en el efluente, según la normatividad que se quiera cumplir.

Para ello, las tecnologías se han clasificado en dos grupos: el primero contempla aquellas con fines de potabilización para el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994 (2000) y, el segundo, incluye tratamientos en los

que la calidad del agua producto podrá cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales), la NOM-002-SEMARNAT-1996 (Descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano municipal), o bien, de uso industrial.

Las tecnologías recomendadas para fines de potabilización (Cr total en el agua producto <0.05 mg/L) varían de acuerdo con la concentración del contaminante en el agua subterránea. Para concentraciones menores o iguales a 3 mg/L, se recomienda la coagulación con sulfato ferroso seguida de filtración directa; los costos de operación y mantenimiento (O & M) van de 0.74 a 1.78 \$/m³, y los costos de inversión (CI) de 0.26 millones de pesos (M\$) por L/s. Este tratamiento es factible para pozos ubicados a lo largo de la pluma de la contaminación, mientras que para tratar agua

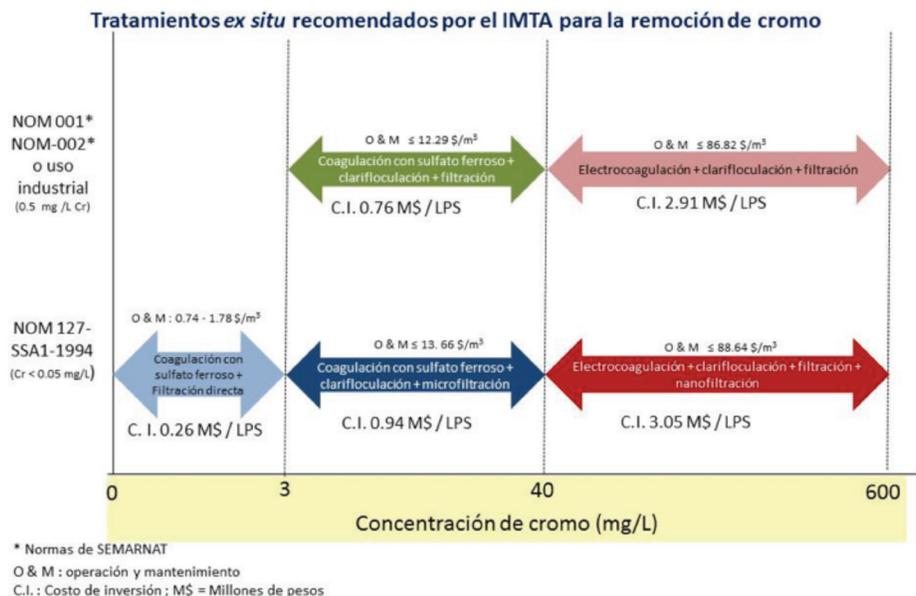


Ilustración 4. Tratamientos ex situ para remover cromo recomendados por el IMTA.

con concentraciones entre 3 y 40 mg/L de Cr, se sugiere el acoplamiento de la coagulación química asistida por redox (sulfato ferroso)-clarifloculación-microfiltración, con un costo de O & M \leq 13.66 \$/m³ y un CI de 0.94 M\$ por L/s. Para concentraciones que oscilen entre 40 y 600 mg/L de Cr, se propone el uso de la electrocoagulación-clarifloculación-filtración-nanofiltración, a un costo estimado de O & M de 88.64 \$/m³ y un CI de 3.05 M\$ por litro sobre segundo.

En el segundo grupo de tecnologías, el agua producto tendrá una concentración de cromo total entre 0.06 y 0.5 mg/L; así que podrán aplicarse para el cumplimiento de las normas antes mencionadas. El primer tren de tratamiento está propuesto para concentraciones entre 3 y 40 mg/L de Cr, y consiste en el acoplamiento de la coagulación química asistida por redox (sulfato ferroso)-clarifloculación-filtración, con un costo de O & M \leq 12.29 \$/m³ y un CI de 0.76 M\$ por L/s; mientras que para concentraciones entre 40 y 600 mg/L de Cr se sugiere la electrocoagulación-clarifloculación-filtración, con un costo de tratamiento de O & M de 86.82 \$/m³ y un CI de 2.91 M\$ por litro sobre segundo.

Todos los tratamientos producen lodos que requieren confinamiento. Los costos de operación incluyen reactivos, consumo de energía y disposición de lodos.

Conclusiones y recomendaciones

La masa del contaminante, tanto en el núcleo de la contaminación como en la pluma contaminante, deberá ser removida del sistema acuífero con el fin de evitar la contaminación de un volumen mayor de agua subterránea.

Se deberá instrumentar una red de monitoreo de la calidad del agua para evaluar la evolución del cromo en el subsuelo. Los piezómetros se deberán construir, al menos, en tres profundidades diferentes para que se evalúe la migración en las diferentes unidades hidrogeológicas.

A través de distintos tratamientos viables es posible ofrecer agua de calidad potable. Estas acciones impactarán en la mitigación de riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente.

De las opciones tecnológicas de tratamiento analizadas, la electrocoagulación es una alternativa factible y conveniente para tratar agua con concentraciones de cromo hasta de 600 mg/L por su baja producción de lodos, alta eficiencia de remoción de contaminante y mínima o nula adición de sólidos disueltos al agua tratada

Bibliografía

- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, (Modificación) de Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SE-MARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SE-

MARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2011). *Evaluación técnico-económica de tecnologías de remoción de cromo para remediación del acuífero Cuautitlán-Pachuca*. Informe técnico. México.

Segeomex-Semarnat (2011). *Reporte de la perforación de piezómetros en la zona de Tultitlán, Estado de México*.

Resumen curricular

Carlos Gutiérrez Ojeda. Ingeniero hidrólogo por la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa (1984), maestro en Aprovechamientos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (1988) y maestro en Ciencias (Hidrología Subterránea) por Universidad de Arizona en Tucson (1995). Sus líneas de investigación incluyen hidrogeología, hidrogeoquímica y recarga de acuíferos.

Alejandra Martín Domínguez. Ingeniería Industrial Química por el Instituto Tecnológico de Durango, maestra en Ciencias en Ingeniería Química por el Instituto Tecnológico de Celaya, México, y DEA y doctora en Ingeniería de Tratamiento y Descontaminación del Agua por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas, Toulouse, Francia. Coordinadora de Calidad del Agua. IMTA. Sus líneas de investigación incluyen potabilización del agua, desinfección solar de agua para consumo humano, electrocoagulación para remoción de contaminantes

específicos en agua y modelación matemática para la interpretación de estudios de trazadores en agua.

Manuel Martínez Morales. Ingeniero geólogo por el Instituto Politécnico Nacional (1988), maestro en Ciencias por la Universidad de Arizona (1995) y doctor en Hidráulica por la UNAM (2012). Sus líneas de investigación incluyen la evaluación geohidrológica a escalas local y regional, y la modelación numérica de flujo del agua subterránea y transporte de contaminantes.

Sara Pérez Castrejón. Ingeniera química por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y maestra en Ciencias en Ingeniería Bioquímica por el Instituto Tecnológico de Celaya. Desarrollo de tecnologías para potabilizar agua, principalmente el tratamiento por electrocoagulación para remover contaminantes del agua, diseño y optimización del proceso.

Iván Emmanuel Villegas Mendoza. Ingeniero químico por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y maestro en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México. Principales líneas de investigación: desarrollo de tecnologías para la potabilización de agua, electrocoagulación para remoción de contaminantes específicos del agua y calidad del Agua.

Sofía Esperanza Garrido Hoyos. Ingeniería en Alimentos por la Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia; maestría en Gestión Medio Ambiental por el Instituto de Investigaciones Ecológicas, Málaga, España, y doctorado en Ciencias Químicas por la Universidad de Granada, Granada, España. Sus principales líneas de

investigación: potabilización, captación y tratamiento de agua de lluvia; tratamiento biológico de aguas residuales y tratamiento y/o aprovechamiento de lodos y biosólidos.

César Guillermo Calderón Mólgora. Maestro en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México. Principales líneas de investigación: tratamiento de agua mediante procesos de membranas, remoción de contaminantes específicos del agua para uso y consumo humano como arsénico, flúor, cromo y sulfatos, y recuperación de agua para uso industrial y potable.

Silvia Lucila Gelover Santiago. Química. Estudios de maestría en Química Analítica

y doctorado en Ingeniería (Energía). Aplicación de tecnologías para la evaluación de la calidad del agua y su tratamiento. Realización de proyectos de investigación y aplicación de procesos fotocatalíticos para destoxificación y desinfección del agua; electrocoagulación para la remoción de contaminantes inorgánicos disueltos en agua (arsénico, sílice y cromo).

Antonio Javier García López. Maestro en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México, con especialidad en Catálisis e Ingeniería de Reactores. Muestreo y evaluación de la calidad del agua en descargas de agua residual y cuerpos receptores, y evaluación de plantas potabilizadoras.

PLAN PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DE LA SUBCUENCA TEJALPA EN EL NEVADO DE TOLUCA

M. A. Yáñez, P. Rivera, W. Wruck, M. Gutiérrez, M. Medina, A. Paredes,
G. Palma, R. Hernández y J. Ramírez

Resumen

No obstante la importancia del Nevado de Toluca, esta Área Natural Protegida (ANP) presenta un importante deterioro ambiental relacionado con el cambio de uso del suelo, de vocación principalmente forestal, a ganadero, agrícola, minero y urbano, entre otros. La pérdida de la cubierta vegetal y el incremento de la erosión hídrica son evidentes disminuyendo, en consecuencia, los bienes y servicios ambientales brindados por esta superficie. Bajo estas circunstancias y en forma paralela a la recategorización del ANP, de “Parque Nacional” a “Área de Protección de Flora y Fauna”, el Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico de la Comisión Nacional del Agua solicitó al IMTA la elaboración de un plan para el manejo sustentable de la subcuenca Tejalpa-Terrerillos, una de las más representativas del Nevado de Toluca. Dicho plan se conformó por diversas actividades con la finalidad de proponer acciones para el manejo de los usos de suelo forestal, agrícola y pecuario, así como iniciar el establecimiento de prácticas de conservación de suelo y agua en forma de represas de geotextiles y módulos agroforestales.

Introducción

En los últimos diez años, la cuenca alta del río Lerma se ha visto afectada en su infraestructura hidráulica y en zonas de población y productivas a causa de inundaciones que han alcanzado miles de hectáreas de afectación. Lo anterior se debe a diversos factores, como son la concentración de precipitaciones en periodos muy cortos, que superan la capacidad de infiltración de los suelos, así como a la gran cantidad de material suelto producto de la deforestación, actividades agrícolas y capas de tierra geológicamente no compactadas en taludes y cauces, arrastrado por los escurrimientos, provocando la reducción de la capacidad hidráulica de obras de conducción y la capacidad de almacenamiento y regulación de las presas.

Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de actuar de forma inmediata para neutralizar los principales procesos erosivos que propician el arrastre de suelos de la parte alta de la cuenca del río Lerma, enfatizando las acciones de intervención en las laderas en el ámbito de subcuencas, para propiciar la presencia de vegetación

arbórea, arbustiva y herbácea que permita captar el agua pluvial infiltrándola al suelo y subsuelo, y evitando, al mismo tiempo, la degradación por erosión y compactación de los suelos. Esto es, atacar las causas del fenómeno erosivo y no sólo atender sus efectos.

La subcuenca del río Tejalpa-Terrerillos se localiza en el municipio de Zinacantepec, Estado de México, en la porción oriental del ANP Nevado de Toluca. Forma parte del alto Lerma, conformada por los ríos Tejalpa-Terrerillos, y abarca una superficie aproximada de 5,048.12 ha. Esta subcuenca se seleccionó por ser representativa de la región, al presentar áreas medianamente conservadas, así como porciones con degradación evidente causada por la presencia de actividades agropecuarias y uso forestal, con la finalidad de que las actividades planteadas en ella puedan ser replicadas en otras de las subcuencas que discurren sus aguas hacia el río Lerma.

Desarrollo

El proyecto comprendió los siguientes componentes: diagnóstico biofísico; diagnóstico socioeconómico; establecimiento de la línea base; proyectos detallados para el uso forestal, agrícola y pecuario; diseño y asesoría para establecimiento de un módulo silvopastoril; identificación de parcelas en descanso para propuesta de reconversión; diseño y establecimiento de módulos agroforestales; establecimiento de represas en cauces pequeños, y diagnóstico de estructuras de gaviones.

Para lograr los resultados esperados se contó con la participación de técnicos y especialistas en cada tema, así como con

el apoyo de mano de obra local para el establecimiento de prácticas de manejo en campo. Las actividades realizadas contemplaron la recopilación de información de estudios previos, recorridos de campo, muestreos y perfiles de suelos, entrevistas con actores de la cuenca, levantamientos topográficos, uso de imágenes de satélite y sistemas de información geográfica para el análisis de la información y métodos de análisis de laboratorio.

Resultados

Los diagnósticos del medio natural y socioeconómico identificaron, localizaron y cuantificaron la problemática, así como sus relaciones causa-efecto en la subcuenca. La problemática ambiental es resultado de la dinámica social existente en la subcuenca, observando una alta incidencia de conflictos relacionados con la tenencia de la tierra. Los diagnósticos se integraron con diversos mapas temáticos que plasman la información referida a: clima, hidrografía, edafología, uso actual del suelo, geología, localidades, población y núcleos agrarios, entre otros temas.

La línea base elaborada examinó el estado actual de los recursos naturales suelo, vegetación y agua, aportando el marco de referencia cualitativo y cuantitativo para analizar los avances, logros, cambios, efectos e impactos generados por las acciones efectuadas durante la ejecución del proyecto y acciones posteriores. Es así como se elaboró el estudio de erosión hídrica actual (ilustración 1), identificándose la degradación de la cubierta vegetal y cuantificando los escurrimientos (Q) y sedimentos (tabla 1). Se encontró que el 38.78% de la superficie de la cuenca presenta tasas de

erosión moderada, donde se requiere de conservación, siendo las principales áreas aportadoras de sedimentos a los cauces agrícolas y de pastizales sin manejo

conservacionista, siendo las principales áreas aportadoras de sedimentos a los cauces.

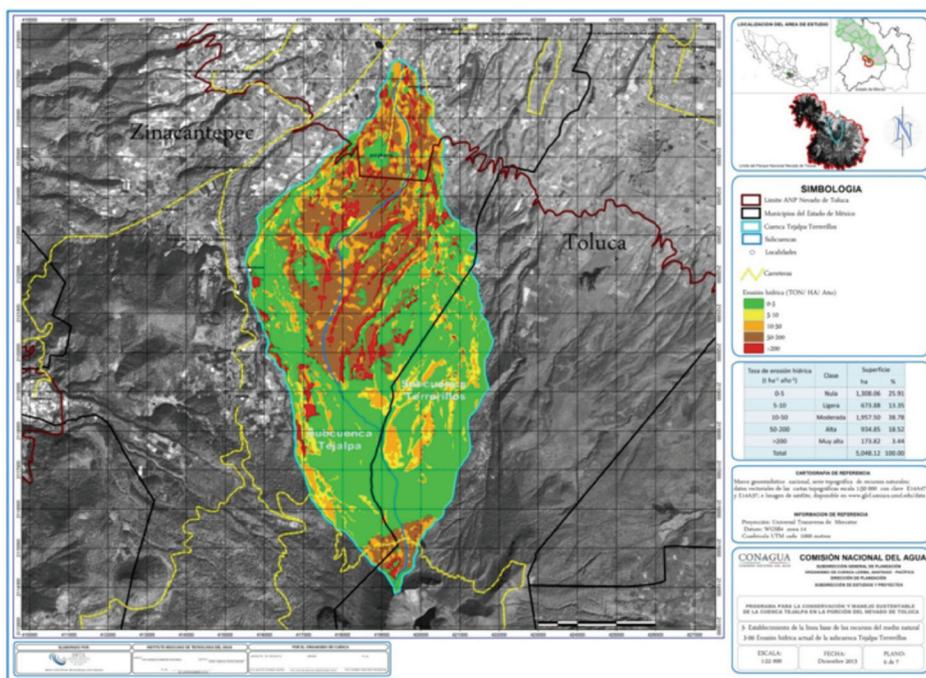


Ilustración 1. Mapa de erosión hídrica actual de la subcuenca Tejalpa-Terrerillos.

Tabla 1. Producción de agua y de sedimentos de la subcuenca Tejalpa-Terrerillos.

Mes	Precipitación (mm)	Q (mm)	Q (miles de m³)	Sedimentos		Volumen precipitado (miles de m³)
				(t/ha)	(miles de t)	
Enero	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Febrero	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Marzo	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Abril	20.00	0.00	0.00	0.000	0.00	1 009.62
Mayo	134.00	0.00	0.00	0.000	0.00	6 764.48
Junio	263.10	9.55	482.32	6.029	30.43	13 281.60
Julio	143.00	0.00	0.00	0.000	0.00	7 218.81

Agosto	312.00	8.22	414.74	5.190	26.20	15 750.13
Septiembre	126.00	0.00	0.00	0.000	0.00	6 360.63
Octubre	66.00	0.00	0.00	0.000	0.00	3 331.76
Noviembre	3.00	0.00	0.00	0.000	0.00	151.44
Diciembre	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
Suma	1 067.1	17.8	897.1	11.219	56.6	53 868.5

Los proyectos detallados de los usos forestal, agrícola y pecuario identificaron y cuantificaron las necesidades de acciones para plantear el manejo conservacionista más conveniente y pertinente. Dichos proyectos incluyen propuestas de manejo relacionadas con prácticas y acciones, formuladas cuidando los criterios y lineamientos de la recategorización contenidas en el Decreto del Área de Protección de Flora y

Fauna del Nevado de Toluca (30 de octubre, 2013).

Se elaboró el proyecto silvopastoril para una superficie de 137.37 ha ubicadas en los Bienes Comunales de Santiago Tlacotepec, Toluca. El proyecto se conformó por diversas propuestas de modelos silvopastoriles, de acuerdo con las características de las diferentes cubiertas vegetales y tipos de terrenos (ilustración 2).

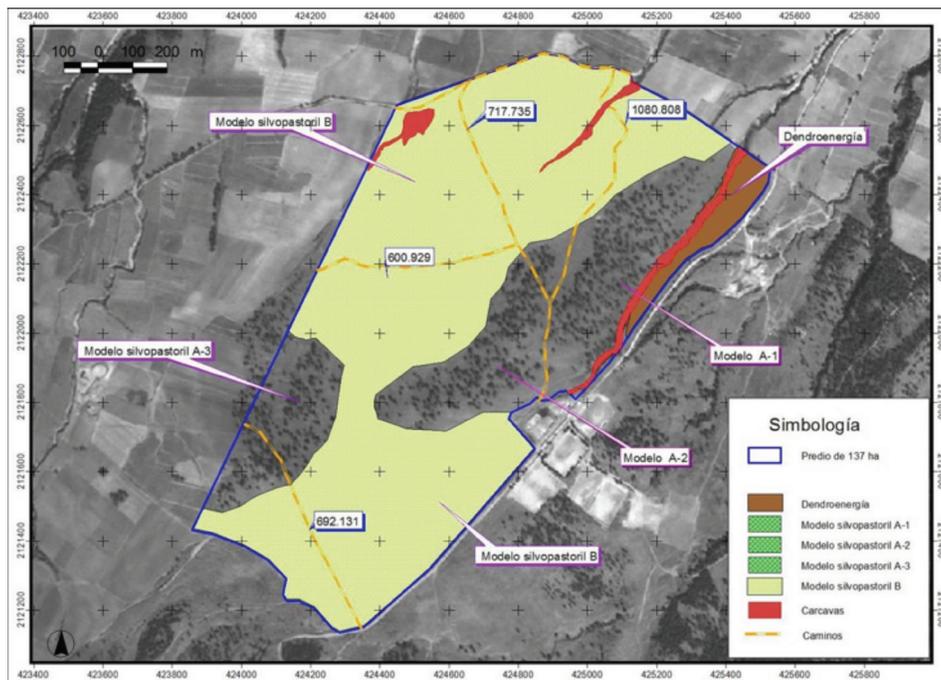


Ilustración 2. Modelos de sistema silvopastoril propuestos en el predio El Arenal.

Mediante imágenes de satélite de alta resolución y con acciones complementarias de campo, se identificaron y cuantificaron las parcelas que permanecen en descanso de las actividades agropecuarias, sitios potenciales para la reconversión productiva hacia la ocupación forestal o la incorporación de técnicas agrosilvícolas o prácticas conservacionistas y/o técnicas de agricultura orgánica, siempre y cuando los terrenos presenten pendientes menores al 15%. Se cuantificaron 269.1 ha como superficie de parcelas en descanso, de las cuales 226.7 ha se encuentran dentro del Área de Protección de Flora y Fauna.

Se establecieron dos módulos agroforestales con fines demostrativos en el ejido San Cristóbal Tecolot, Zinacantepec, Estado de México, con una superficie aproximada

de 1.0 ha cada uno, introduciendo el uso de terrazas de formación sucesiva con plantación de especies forestales y cultivo de avena (ilustración 3).

En el ejido de San Juan de Las Huertas, Zinacantepec, Estado de México, se establecieron 65 represas no filtrantes de geocostales en una superficie aproximada de 6.84 ha, que concentra manantiales para aprovechamiento de agua potable, seleccionando cauces de 1.0 m de profundidad y de 1.5 a 6.0 m de ancho (ilustración 4). Con su establecimiento se retendrán 632.0 m³ de azolve, incrementando la infiltración y recarga el acuífero, así como también el mejoramiento del suelo y de la cubierta vegetal, facilitando el establecimiento y desarrollo de las especies forestales nativas.



Ilustración 3. Módulo agroforestal con terrazas de formación sucesiva y plantación de especies forestales.



Ilustración 4. Represas de geocostal establecidas en la subcuenca Tejalpa-Terrerillos.

Finalmente, se realizó un recorrido de campo para la identificación y diagnóstico de las estructuras de gavión presentes en la subcuenca de estudio, así como las localizadas sobre el río Santiaguito, municipio de Tenango del Valle, mencionando las causas de las fallas observadas en ellas. Asimismo, se generó un pequeño manual donde se mencionan las recomendaciones para su establecimiento y mantenimiento en el área de estudio, y la descripción de prácticas de conservación complementarias a ellas.

Conclusiones y recomendaciones

En la subcuenca Tejalpa-Terrerillos se observa una explotación intensiva de las áreas agrícolas, que conlleva a la degradación del suelo y generación de escurrimientos y sedimentos que afectan las partes bajas de la cuenca.

La restauración y el manejo de los recursos naturales requieren de una base social más amplia y con mayor participación para realizar diagnósticos, establecer normas, proponer zonificaciones y ejecutar proyectos concretos. La participación se torna imprescindible para todo tipo de propuestas de acciones y cambios que se generen en las actividades efectuadas en la superficie de la subcuenca, particularmente aquellas involucradas en la zona resguardada por el Área Natural Protegida.

Los resultados obtenidos proporcionan conocimiento con relación a la problemática de la subcuenca Tejalpa-Terrerillos, identificando las acciones que deben emprenderse conforme y en respaldo a la ejecución del decreto como Área de Protección de Flora y Fauna. Para ello, debe respaldarse con la formulación de proyectos en beneficio de los habitantes de la zona

que estimulen su participación, identificando su interés en participar al momento de manifestar su preocupación por el deterioro de los recursos naturales agua, suelo y bosque.

Bibliografía

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2013). *Estudio previo justificativo para la modificación de la declaratoria del Área Natural Protegida Parque Nacional Nevado de Toluca*. México: Semarnat, 123.

Diario Oficial de la Federación (2013). Decreto que reforma, deroga y adiciona diversas disposiciones del diverso publicado el 25 de enero de 1936, por el que se declaró Parque Nacional la montaña denominada “Nevado de Toluca”, que fue modificado por el diverso publicado el 19 de febrero de 1937. (Primera sección). Semarnat, México, 1º de octubre.

Faustino, M. J. (2006). *Guía para elaborar planes de gestión de cuencas*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, Escuela de Postgrado, 26.

Figueroa, S. B., Amante, O. A., Cortés, T. H. G., Pimentel, L. J., Osuna, C. E. S. y Rodríguez, O. J. M. (1991). *Manual de predicción de pérdida de suelo por erosión*. Estado de México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Agricultura, Dirección General de Política Agrícola, Colegio de Postgraduados, 162.

Franco, S., Regil, H. H., González, C. y Nava, G. (2006). Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000. México: *Investiga-*

ciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 61, 38-57.

Resumen curricular

Marcia Adriana Yañez Kernke. Ingeniera agrónoma por la Universidad Autónoma Chapingo (1990) y M. Sc. en Sistemas de Producción Animal por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (1996). Sistemas de producción animal, manejo del pastoreo y sistemas silvopastoriles, prácticas conservacionistas en áreas de uso pecuario.

Pedro Rivera Ruíz. Ingeniero agrónomo por la Universidad Autónoma Chapingo (1990), maestría en Edafología (1996) y candidato Dr. Hidrociencias por el Colegio de Postgraduados. Manejo integral de cuencas hidrográficas, conservación de agua y suelo, erosión-productividad, modelos hidrológicos aplicados a cuencas, modelos matemáticos de erosión, análisis multiescala de los procesos lluvia-escurrimiento-erosión, evaluación de técnicas de preparación de suelos para reforestación y procesos hidrológicos, y evaluación de impactos ambientales de tecnologías conservacionistas con cuencas pareadas.

Javier Ramírez Luna. Ingeniero en Irrigación por la Universidad Autónoma Chapingo (1990) y doctor en Hidráulica por la Escuela Nacional de Ingeniería de Aguas y Bosques, Montpellier, Francia (1997). Simulación del comportamiento hidráulico de canales en régimen permanente y transitorio, diseño y calibración de estructuras hidromecánicas, operación óptima de canales de riego, diseño de estructuras de medición para canales abiertos, desarrollo de tecnología en ul-

trasonido para la medición de caudal, desarrollo de tecnología en colecta y procesamiento de información hidroagrícola-económica para mejorar la operación de las zonas de riego y desarrollo

de tecnología gráfica de información tipo GIS para la presentación geoposicionada en mapa satelital de información hidroagrícola-estadística-económica de zonas de riego.

RIESGOS SANITARIOS POR EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUA DE ABASTECIMIENTO

J. E. Cortés, C. G. Calderón, E. B. Estrada, A. González, E. Ramírez, L. Montellano, S. L. Gelover, J. Cruz, E. V. Serrano y A. Gómez

Resumen

Mediante la adaptación de una metodología de evaluación de riesgos a la salud, se estimó la exposición a contaminantes emergentes y no regulados en agua para consumo humano de la ciudad de Guanajuato, Guanajuato, considerando que las fuentes de abastecimiento se encuentran afectadas por contaminación de origen antrópico. El objetivo fue generar información, a fin de que el organismo operador de agua potable tenga certeza de la inocuidad del agua que suministra a la población. De los más de seiscientos contaminantes emergentes y no regulados identificados en el agua residual, agua residual tratada, influente y efluente de la planta potabilizadora, 183 y 182 califican como altamente peligrosos para la salud pública y el ambiente, respectivamente, y 14 persistieron a los procesos convencionales de tratamiento y potabilización. Se requiere de tratamiento adicional a los efluentes de la planta de aguas residuales y la potabilizadora, dado que bajo un escenario crítico se identificó alto riesgo a la salud asociado con la presencia de mestranol y acetaminofén.

Introducción

De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (2013), en 2012 solamente el 47.48% de las aguas residuales municipales y 28.85% de las industriales recibieron algún tipo de tratamiento. Esto significa que una fracción importante de aguas residuales crudas se liberan al ambiente acuático, incluyendo fuentes de abastecimiento para consumo humano, lo que constituye el reúso no planeado, o de hecho, de aguas residuales con fines potables. Esta situación no es nueva y en el ámbito internacional está cobrando cada vez mayor preocupación y atención debido a que las aguas residuales contienen una gran cantidad de contaminantes no regulados (CNR) y emergentes (CE), que son descargados en las fuentes de abastecimiento (Leverenz, et al., 2011; Rice, et al., 2013).

La gama de CNR y CE es muy amplia y se desconoce la magnitud real de los riesgos potenciales para la salud humana y el ambiente. Aun los países industrializados carecen de recursos económicos suficientes para desarrollar los estudios toxicológicos y epidemiológicos necesarios para deter-

minar dichos riesgos, por lo que algunas agencias han desarrollado metodologías que pueden ser utilizadas en la evaluación de riesgos a la salud y la priorización de algunos contaminantes no regulados y contaminantes emergentes.

En el presente trabajo, se aborda el problema de la contaminación antropogénica de las fuentes de abastecimiento superfi-

cial y el reúso de aguas residuales de facto, para la ciudad de Guanajuato, Guanajuato, adaptando una metodología de evaluación de riesgos a la salud (ilustración 1). El objetivo fue generar información para dar certeza al organismo operador sobre la inocuidad del agua que suministra a la población, considerando que las presas La Esperanza y La Soledad se encuentran afectadas por contaminación puntual y difusa.



Ilustración 1. Esquema de la metodología de evaluación de riesgos sanitarios.

Se llevó a cabo un muestreo puntual para la determinación de los parámetros regulados en la normativa mexicana, compuestos orgánicos volátiles (COV) y semivolátiles (COSV), fármacos y productos para el cuidado personal (FPCP) y hormonas en el influente y efluente de la planta de tratamiento de agua residuales (PTAR) Centro

y la potabilizadora Los Filtros. En paralelo, se aplicó un cuestionario a quinientos residentes de la ciudad de Guanajuato, con la finalidad de obtener información referente al estatus de salud, uso y consumo de agua, uso y consumo de fármacos y otros productos para el cuidado e higiene personal.

Resultados

La ciudad de Guanajuato se abastece de agua para uso y consumo humano mediante 14 pozos profundos, el sistema de la batería de pozos de Puentecillas y de las presas La Esperanza, La Soledad y de Mata (ilustración 2). El total de la población de

las 14 localidades asentada en las cuencas La Soledad y La Esperanza es de 2,050 habitantes, por lo que independientemente de la contaminación que se genere fuera de las microcuencas locales y de las aportaciones pluviales, la presa La Soledad recibe directamente aguas residuales de las localidades de Santa Ana y Llanos de Santa Ana.



Ilustración 2. Fuentes de abastecimiento superficiales para la ciudad de Guanajuato, Gto., México.

El agua de las presas La Esperanza y La Soledad se envía a la planta potabilizadora denominada Los Filtros, la cual procesa un caudal de entre 80 y 130 L/s. El sistema de potabilización consiste de: oxidación con cloro, coagulación con policloruro de aluminio (PAC), floculación, sedimentación, filtración, desinfección con cloro y prensado de lodos agregando polímero. Además, la ciudad cuenta con una PTAR Centro que recibe el agua residual urbana proveniente del sistema de alcantarillado público y la descarga en las inmediaciones del río Guanajuato ya saneada. El proceso se compone de tratamiento primario, tratamiento secundario con lodos activados en zanjas

de oxidación y desinfección con luz ultravioleta.

El agua potabilizada cumple con los límites permisibles para los parámetros de calidad del agua que establece la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994; sin embargo, durante el proceso de evaluación del desempeño de la planta, a través del día se presentaron niveles de color y turbiedad fuera de norma.

El efluente tratado de la PTAR Centro cumple con los límites máximos permisibles de contaminantes que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996, en las descargas de aguas

residuales en aguas y bienes nacionales. No obstante, derivado de la evaluación de desempeño de la planta, se recomienda un tratamiento adicional para la remoción de nutrientes.

Considerando el influente y efluente de la potabilizadora y la PTAR, se identificaron

alrededor de 650 CE y CNR, que incluyen agentes saborizantes y fragancias, químicos industriales, fármacos, sustancias naturales y otros grupos de compuestos menos diversos (ilustración 3), entre los que destacan las hormonas, debido al impacto que tienen sobre la salud humana y el ambiente.



Fuentes utilizadas para la clasificación:
 The Good Scents Company Information System: <http://www.thegoodscentscompany.com/index.html>
 Health and Consumers: http://ec.europa.eu/dgs/health_consumer/index_en.htm
 Drug Information Portal: National Library of Medicine: <http://druginfo.nlm.nih.gov/drugportal/>
 Household Products Data Base: <http://hpd.nlm.nih.gov/index.htm>
 Toxicology Data Network: <http://toxnet.nlm.nih.gov/>

Ilustración 3. Contaminantes orgánicos emergentes y no regulados en el agua residual, residual tratada, fuente de abastecimiento y agua potabilizada.

Cualitativamente, el agua residual cruda presentó la mayor diversidad de CE y CNR, seguida por el influente de la potabilizadora (tabla 1); 14 moléculas persistieron a los procesos de tratamiento de agua residual y de potabilización (tabla 2); 183 son altamente peligrosos para la salud humana y vida silvestre, y 182 califican como altamente peligrosos para los sistemas acuáticos.

Cuantitativamente, en la fuente de abastecimiento se identificaron concentraciones ultratrazas (ng/L) de una hormona sintética (mestranol), un antibiótico (sulfametoxazol), un antineuroléptico (benzatropina), una droga ilícita o de abuso (cocaína) y un repelente de insectos (DEET), el cual mostró ser resistente al proceso de potabilización (tabla 3).

Tabla 1. Número de CE y CNR identificados en la planta potabilizadora Los Filtros y la PTAR Centro.

Planta potabilizadora	Los Filtros		PTAR Centro	
			Efluente desinfectado con UV	
Influente	Efluente desinfectado	Influente	Antes	Después
260	195	348	141	156

Tabla 2. Contaminantes que persistieron al proceso de tratamiento en la PTAR Centro y la planta potabilizadora Los Filtros.

No. Cas	Compuesto	Usos/observaciones
Hormonas		
72-33-3	Mestranol	Estrógeno sintético. Se utiliza como terapia de reemplazo hormonal en la menopausia y en combinación con progestógeno como anticonceptivo oral.
Fármacos		
298-46-4	Carbamazepina	Antiepiléptico y analgésico específico para la neuralgia trigeminal.
29122-68-7	Atenolol	β -bloqueador. Se usa solo o en combinación con otros medicamentos para tratar la hipertensión. También se usa para prevenir la angina (dolor en el tórax) y tratamiento de ataques cardíacos.
Químicos industriales		
79-34-5	Etano, 1,1,2,2-tetracloro-	Solvente para grasas, aceites, ceras, resinas, acetato de celulosa y en ciertas reacciones de Friedel-Crafts, entre otros usos industriales
88-99-3	Ácido ftálico	Medicina y síntesis orgánica. Reactivo analítico. Elaboración de colorantes, feloftaleína, ftalamida, ácido antranílico y perfumes sintéticos.
110-86-1	Piridina	Usos industriales diversos. Reactivo de laboratorio.

286-28-2	7-Tiabiciclo[4.1.0]heptano	Síntesis química.
2050-67-1	PCB-11	Bifenilos policlorados.
Substancias naturales y extractivas		
119-61-9	Benzofenona	Sustancias saborizantes sintéticas y adyuvantes. Aditivo de alimentos. Se permite adición directa en alimentos para consumo humano. Fijador para perfumes.
629-78-7	Heptadecano	Agentes aromatizantes, cosméticos.
1125-21-9	2,6,6-Trimetil-2-ciclohexene-1,4-diona	Saborizante autorizado para su uso en alimentos de consumo humano. Se encuentra en las hojas de diversos té y tabaco.
Productos para el cuidado personal		
134-62-3	Dietiltoluidina (DEET)	También conocido como DEET. Se utiliza como repelente de insectos.
Metabolitos e impurezas		
360-68-9	Colestan-3-ol, (3 α ,5 α)-	Un derivado del colesterol. Se encuentra en heces humanas, cálculos biliares, huevo y otros materiales biológicos.

Tabla 3. Valores guía para tres de los cinco CE identificados en la planta potabilizadora Los Filtros.

Compuesto	Influyente	Efluente Concentración ng/L	Valor guía ¹
Mestranol	557	ND ²	2.5E+00
Sulfametoxazol	10.2	ND	3.5E+04
Benzotropina	3.31	ND	--
Cocaína	1.02	ND	--
DEET	6.18	523	2.5E+03

¹ Australian Guidelines for Water Recycling (2008).

² ND: No detectado.

En la PTAR Centro se identificaron alrededor de 55 CE, incluyendo hormonas naturales y sintéticas, fármacos, metabolitos de fármacos y productos para el cuidado personal (tabla 4). Es importante anotar la presencia de una amplia

gama de antibióticos, antihipertensivos, antidepressivos, ansiolíticos e hipoglucemiantes en el agua, lo cual fue cualitativamente consistente con los datos proporcionados por los participantes de la encuesta.

Tabla 4. Hormonas, fármacos y productos para el cuidado personal detectados en el influente y efluente de la PTAR Centro (ng/L).

Compuesto	Agua residual cruda	Efluente tratado y desinfectado con UV		Usos
		Antes	Después	
Albuterol	3.58	8.58	7.25	Broncodilatador.
Anfetaminas	27	ND	ND	Estimulante del sistema nervioso central.
Atenolol	80.4	110	104	Antihipertensivo.
Androstenediona	390	15.2	18.6	Hormona natural en las mujeres y hombres.
Androsterona	750	<88.4	<105	Hormona esteroide que proviene del metabolismo de la testosterona.
Mestranol	741	399	502	Anticonceptivo oral. Tratamiento de síndrome climatérico y alteraciones relacionadas.
Progesterona	44.6	<1.6	<1.6	Hormona sexual femenina.
Testosterona	57.9	<4.57	<3.3	Hormona esteroide de un grupo andrógeno y es encontrada en los mamíferos, reptiles, aves, y otros vertebrados.
Furosemida	173	165	80.3	Diurético.
Gemfibrozil	10.5	20.4	27.1	Regulador lipídico.
Gliburida	47.8	70.9	55.2	Hipoglucemiante.
2-Hidroxi-ibuprofeno	3010	260	174	Metabolito de ibuprofeno.

Ibuprofeno	975	59.5	<29	Analgésico y antiinflamatorio no esteroideo.
Naproxeno	8040	205	148	Analgésico y antiinflamatorio no esteroideo.
Triclocarban	398	74.1	71.2	Antiséptico.
Triclosan	543	<123	<116	Antiséptico.
Acetaminofén	31100	<30.6	<29	Analgésico.
Azitromicina	41.6	77.1	92.2	Tratamiento de infecciones genitales.
Cafeína	12400	<33.4	<29	Se encuentra en productos de uso frecuente; también se indica en combinación con analgésicos para aliviar dolor.
Carbamazepina	70.7	196	196	Antiepiléptico y analgésico. Se indica para el tratamiento de la migraña.
Ciprofloxacino	478	405	379	Antibiótico.
Claritromicina	279	727	794	Antibiótico.
Cloxacilina	21.5	<6.13	<5.8	Antibiótico.
Dehidronifedipino	<2.47	5.34	5.67	Antihipertensivo.
Difenhidramina	23.2	49	48	Antihistamínico.
Diltiazem	6.48	6.53	6.38	Antianginoso y bloqueador de los canales de calcio.
Eritromicina-H ₂ O	244	412	419	Antibiótico.
Fluoxetina	<6.16	6.6	7.56	Antidepresivo.
Lincomicina	204	89.7	87.1	Antibiótico.
Miconazol	9.05	<3.06	<2.9	Antimicótico.
Norfloxacin	<83.4	<147	107	Antibiótico del grupo de las quinolonas.
Ofloxacin	201	399	431	Antibiótico (quinolona fluorada).
Sulfadiazina	217	175	175	Antibiótico.

Sulfametoxazol	1100	1560	1190	Antibiótico.
Trimetoprima	652	312	319	Antibiótico.
1,7-Dimethylxantina	14200	703	787	Compuesto semejante a la cafeína.
Alprazolam	<1.23	1.23	0.811	Ansiolítico.
Amitriptilina	4.37	2.45	2.26	Antidepresivo.
Benzoilecgonina	111	15	16.2	Metabolito de cocaína.
Benzotropina	<2.88	<1.43	<1.35	Agente anticolinérgico y antihistamínico.
Cocaína	9.88	2	2.03	Droga de abuso y también tiene uso terapéutico. Tiene efecto sobre el sistema nervioso central.
DEET	239	101	93	Repelente de insectos.
Desmethyldiltiazem	1.53	1.71	1.47	Metabolito del diltiazem.
Diazepam	1.65	3.54	3.33	El diazepam se utiliza para tratar estados de ansiedad.
10-hydroxy-amitriptyline	2.24	0.847	0.815	Metabolito de la amitriptilina.
Meprobamate	16.9	43.2	48.2	Ansiolítico y tranquilizante.
Metoprolol	117	143	146	Antihipertensivo.
Norverapamil	<0.67	1.61	2.11	Metabolito de verapamilo; tiene efectos vasodilatadores.
Propoxyphene	2.41	5.96	5.61	Analgésico.
Propranolol	15.3	39.6	38.3	Antihipertensivo.
Sertraline	3.11	5.99	6.09	Antibiótico sintético de las fluoroquinolonas.
Theophylline	8070	362	565	Tratamiento de problemas respiratorios, broncodilatador.
Valsartan	1620	122	135	Antihipertensivo.
Verapamil	1.56	3.51	3.53	Arritmias supraventriculares, angina, hipertensión.
Estrone	39.9	<8.01	<7.98	Hormona natural. Estrogénica secretada por el ovario, así como el tejido adiposo.

La exposición potencial a CE y CNR puede ser determinada mediante diferentes metodologías, que incluyen evaluaciones cualitativas que indican peligro del potencial para la exposición a través del agua. Conceptualmente, la ilustración 4 sintetiza las principales rutas de exposición

humana a moléculas farmacológicamente activas. Se espera que algunas de las rutas no se completen; por ejemplo: es poco probable que algunas moléculas se volatilicen lo suficiente como para producir una dosis relevante para la vía aérea (inhalación).

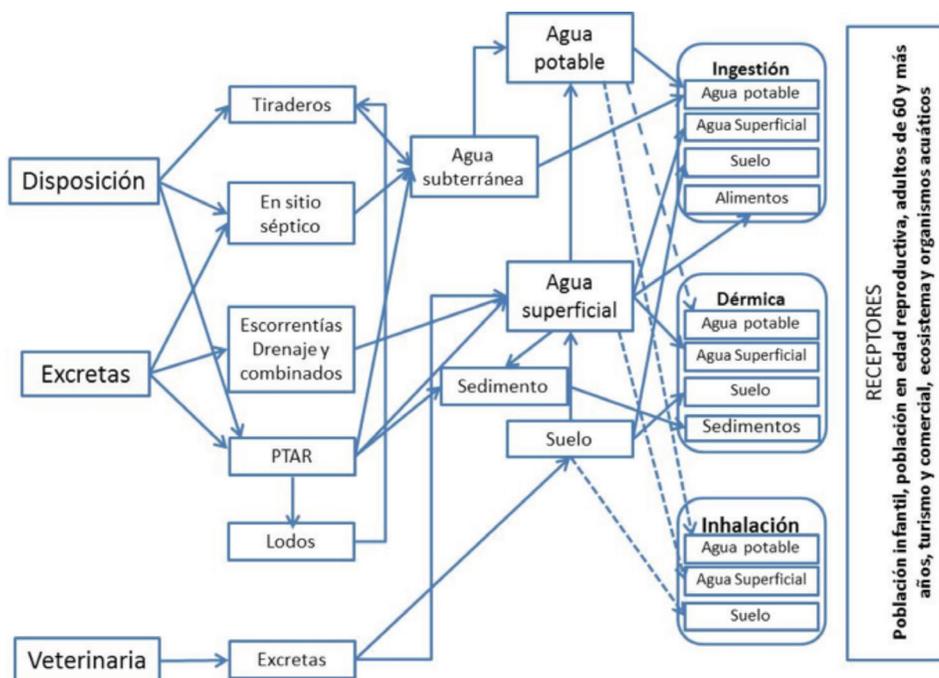


Ilustración 4. Principales rutas de exposición potencial a contaminantes emergentes y no regulados.

El destino de los contaminantes está fuertemente influido por sus características fisicoquímicas, de tal manera que los contaminantes altamente polares e hidrofílicos son de gran importancia debido a su alta movilidad en agua (NAP, 1999). Asimismo, se piensa que la vía dérmica es poco importante, por lo que se espera que la ingestión de CE y CNR por medio del agua potable, sea la vía de exposición

ambiental relevante. No obstante, para la fracción de la población que reside en las cercanías de las descargas de aguas residuales y en algunas zonas de los cuerpos receptores, puede haber otras vías de exposición, pues los contaminantes una vez liberados al ambiente no permanecen estáticos y se distribuyen en los diferentes compartimientos ambientales (ilustración 5).

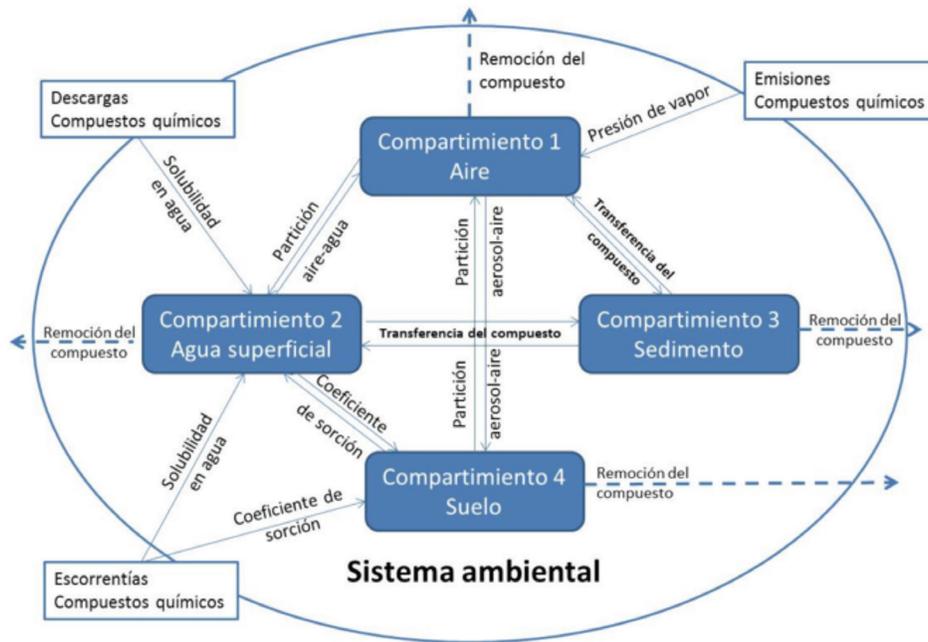


Ilustración 5. Diagrama esquemático para representar la distribución de los contaminantes en el ambiente.

Con base en la ingestión de agua estimada mediante encuesta y la ingesta aceptable diaria (ADI, por sus siglas en inglés), se cuantificó la exposición y se caracterizó el riesgo para algunos FPCP y hormonas (tabla 5). En el peor escenario, el supuesto es que ingrese a la planta potabilizadora una calidad de agua semejante a la del agua residual cruda; entonces, la población ingeriría dosis de hormonas y FPCP que resultan en un índice de riesgo (IR) de 352, lo que significa

que hay riesgos adversos a la salud debido a la exposición a mestranol (cociente = 347) y acetaminofén (cociente de peligro = 2.76), lo que implica riesgos altos para la salud; la exposición a las concentraciones en el efluente tratado se reducirían a un IR de 202. Esto demuestra que antes de descargar el efluente tratado de la PTAR al río Guanaajuato o a alguna de las presas, éste deberá recibir un tratamiento adicional para la remoción de CE, CNR y nutrientes.

Tabla 5. Cocientes de peligro e índice de riesgo por consumo de FPCP y hormonas, en el peor escenario de exposición.

Contaminantes emergentes en la PTAR Centro	ADI ng/kg*d	Ingesta crónica diaria (ng/kg*d)		Cociente de peligro (CP)	
		Cruda	Efluente final	Cruda	Efluente final
Acetaminofén	8.30E+02	2.29E+03	5.15E-01	2.76E+00	6.21E-04

Azitromizina	1.10E+04	1.32E+01	2.45E+00	1.20E-03	2.23E-04
Cafeína	1.50E+08	1.08E+03	1.70E+00	7.20E-06	1.13E-08
Carbamazepina	3.40E+02	5.80E+00	7.27E+00	1.70E-02	2.14E-02
Ciprofloxacino	7.10E+03	6.46E+01	6.05E+00	9.09E-03	8.52E-04
Claritromicina	7.10E+03	2.28E+01	1.08E+01	3.22E-03	1.52E-03
Dehidronifedipina	5.70E+02	0.00E+00	3.09E-01	0.00E+00	5.41E-04
Diltiazem	1.70E+03	6.32E-01	1.99E-01	3.72E-04	1.17E-04
Eritromicina-H ₂ O	4.00E+04	3.40E+01	1.85E+01	8.49E-04	4.63E-04
Fluoxetina (Prozac)	2.80E+02	0.00E+00	1.98E-01	0.00E+00	7.07E-04
Lincomicina	1.00E+06	4.83E+01	5.23E+00	4.83E-05	5.23E-06
Sulfametazina	1.00E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sulfametoxazol	1.30E+05	6.82E+01	6.66E+01	5.25E-04	5.12E-04
Atorvastatina	1.40E+02	6.22E-01	0.00E+00	4.45E-03	0.00E+00
Cimetidina	5.70E+03	0.00E+00	2.39E-02	0.00E+00	4.19E-06
Cotina	2.80E+02	5.26E+01	1.20E+00	1.88E-01	4.30E-03
Enalapril	3.60E+02	4.96E+00	0.00E+00	1.38E-02	0.00E+00
Metformina	7.10E+03	3.15E+03	8.60E+01	4.43E-01	1.21E-02
Tetraciclina	3.00E+05	3.73E+00	6.89E-01	1.24E-05	2.30E-06
Gemfibrozil	1.30E+03	2.46E+00	1.64E-01	1.89E-03	1.26E-04
Ibuprofeno	1.14E+04	5.99E+01	1.62E+00	5.26E-03	1.42E-04
Naproxeno	6.30E+03	4.26E+02	3.40E+00	6.76E-02	5.40E-04
Triclosan	1.90E+02	3.08E+01	0.00E+00	1.62E-01	0.00E+00
N,N-Dietil-meta-toluamida	8.20E+01	2.45E+01	3.34E+00	2.99E-01	4.08E-02
Diazepam	7.10E+01	1.04E-01	1.69E-01	1.47E-03	2.38E-03
Meprobamato	7.78E+04	0.00E+00	2.12E+00	0.00E+00	2.72E-05
Metoprolol	1.40E+04	7.59E+00	5.86E+00	5.42E-04	4.18E-04
Propranolol	1.14E+03	0.00E+00	1.54E+00	0.00E+00	1.35E-03
Mestranol	7.10E-02	2.47E+01	1.43E+01	3.47E+02	2.02E+02

17β-estradiol	5.00E+00	1.05E+00	0.00E+00	2.10E-01	0.00E+00
Estrona	1.30E+01	1.78E+00	0.00E+00	1.37E-01	0.00E+00
Progesterona	3.00E+04	2.67E+00	0.00E+00	8.90E-05	0.00E+00
Testosterona	2.00E+03	2.95E+00	0.00E+00	1.47E-03	0.00E+00
ÍNDICE DE RIESGO				3.52E+02	2.02E+02

Bajo las condiciones actuales, si la planta potabilizadora no remueve mestranol, la población ingeriría hasta 261 veces la ADI, dado que este es un contaminante que persistió al tratamiento en la PTAR. Se deberá asegurar que esta hormona no esté presente en el agua potabilizada, lo cual requiere un tratamiento adicional para el efluente potabilizado mediante el proceso convencional.

A reserva de llevar a cabo pruebas de tratabilidad en sitio, para la PTAR Centro se espera que el proceso Fenton pueda ser utilizado como un tratamiento de pulimento para la remoción de la mayoría de los CE identificados, así como de los nutrientes que no son eliminados en el proceso de tratamiento. En la planta potabilizadora Los Filtros, la adsorción en carbón activado es una alternativa viable para la remoción de CE como postratamiento del agua potabilizada.

Conclusiones y recomendaciones

En materia de calidad del agua para consumo humano y descargas de aguas residuales, la normatividad vigente ha sido rebasada. Para la protección de la salud pública y de la salud de los cuerpos de agua es necesaria una actualización con el enfoque de riesgo más que económico.

Los datos muestran que, consistente con lo reportado en otros estudios, las concentraciones a las cuales los CE se encuentran en el agua de consumo humano no representan en lo general riesgos sanitarios en el corto plazo. No obstante, dados los cocientes de peligro estimados para el mestranol y el acetaminofén, es prioritario mejorar los procesos de tratamiento de aguas residuales y de potabilización del agua, así como sanear y proteger las presas La Esperanza y La Soledad.

La presencia de moléculas farmacológicamente activas en el agua residual y agua residual tratada es importante, porque más allá de la descarga puntual del efluente a los cuerpos de agua superficiales, la posterior transformación o disminución de la concentración dependerá de procesos naturales que no pueden ser considerados una medida de control o barrera suficiente para asegurar la inocuidad del agua, por lo que siempre será necesario que el efluente tratado mediante métodos convencionales reciba tratamiento adicional, a fin de eliminar tanta contaminación como sea posible antes de la descarga al cuerpo receptor. Por otro lado, la protección de las fuentes de abastecimiento requiere del control de la contaminación puntual y difusa desde su origen.

Las medidas de saneamiento en las presas y el tratamiento adecuado de las aguas residuales, permitirán controlar los 323 contaminantes que califican como altamente peligrosos para el ambiente acuático.

Bibliografía

- EPHC, NRMCM & NHMRC (2008). *Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2), Augmentation of Drinking Water Supplies*, Canberra, 126.
- Leverenz, H. L., TCHOBANOGLIOUS, G. & ASANO, T. (2011). Direct Potable Reuse: a Future Imperative, *Journal of Water Reuse and Desalination*, 1(1): 2-10.
- NOM-127-SSA1-1994. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, Secretaría de Salud, *Diario Oficial de la Federación*, 22 de noviembre de 2000.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales Secretaría del Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca, *Diario Oficial de la Federación*, 6 de enero de 1997.
- Raice, J., P. Westerhoff, P. & Wutich, A. (2013). Assessment of De Facto Wastewater Reuse Across the USA: Trends between 1980 and 2008, *Environ. Sci. Technol.* DOI: 10.1021/es402792s, publication date (web): 19 Aug 2013.

Resumen curricular

Juana Enriqueta Cortés Muñoz. Química farmacobióloga por la Universidad Autónoma Metropolitana, y maestría en Ciencias (Salud Ambiental) y créditos de doctorado en Ciencias de la Salud Pública por la Escuela Nacional de Salud Pública. Especialista en Hidráulica del IMTA. Ha publicado, como autora principal y coautora, artículos para revistas de divulgación científica, arbitradas e indizadas; así como en congresos nacionales e internacionales. Su principal línea de trabajo actual es la evaluación de riesgos por exposición a contaminantes emergentes y no regulados.

César Guillermo Calderón Mólgora. Maestro en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México. Principales líneas de investigación: tratamiento de agua mediante procesos de membranas, remoción de contaminantes específicos del agua para uso y consumo humano como arsénico, flúor, cromo y sulfatos, y recuperación de agua para uso industrial y potable.

Edson Baltazar Estrada Arriaga. Ingeniero químico por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, y maestro y doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: tratamiento de aguas residuales municipales y efluentes industriales mediante procesos fisicoquímicos y procesos biológicos aerobios y anaerobios; aplicación de biorreactores con membranas para el tratamiento y reúso de aguas residuales; remoción de contaminantes emergentes, y generación de electricidad mediante celdas de combustible microbianas a partir de desechos sólidos orgánicos y aguas residuales.

Mercedes Esperanza Ramírez Camperos. Ingeniera química por la Universidad Industrial de Santander, Colombia, y maestra en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México. Especialista en Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y profesora de asignatura del Programa de Posgrado de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Áreas de interés. Tratamiento de aguas residuales y lodos residuales, reúso del agua, remoción de contaminantes tóxicos, tratamiento magnético del agua.

Leticia Montellano Palacios. Química industrial y maestra en Administración por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Desarrollo de la patente “Método para el tratamiento de lodos provenientes del tratamiento de agua, recuperación del coagulante y disposición”. Elaboración de más de cuarenta informes técnicos, 15 artículos en revistas y congresos y seis manuales técnicos sobre desinfección, evaluación de plantas potabilizadoras, control de reactivos químicos para la potabilización, validación de técnicas por métodos rápidos, habilidad en la operación de equipos: potenciómetros, colorímetros, conductímetros, turbidímetros, cromatografía, carbono orgánico total y espectrofotometría.

Silvia Lucila Gelover Santiago. Química. Estudios de maestría en Química Analítica y doctorado en Ingeniería (Energía). Aplicación de tecnologías para la evaluación de la calidad del agua y su tratamiento. Realización de proyectos de investigación y aplicación de procesos fotocatalíticos para destoxificación y desinfección del agua; electrocoagulación para la remoción

de contaminantes inorgánicos disueltos en agua (arsénico, sílice y cromo).

José Cruz García Garduño. Ingeniero químico por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, diplomado en Habilidades Docentes por la Universidad Internacional y pasante de maestría en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Tiene experiencia en muestreo y análisis de aguas y aguas tratadas para su potabilización. Ha colaborado en proyectos e informes técnicos en el IMTA. Ha sido responsable del laboratorio de Ingeniería Ambiental en la UNAM, campus Morelos, y profesor del laboratorio de Química Ambiental, de la UNAM.

Edgar Vicente Serrano Alvarado. Licenciado en Administración por la Universidad Nacional Autónoma de México. Tiene 19 años de experiencia en servicios de salud en Morelos, jefe de oficina (Recursos Humanos), verificador sanitario, líder de proyecto, jefe del Departamento de Salud Ambiental de la Comisión para la Protección contra los Riesgos Sanitarios del Estado de Morelos, enlace administrativo en la Jurisdicción Sanitaria I, administrador del Laboratorio Estatal de Salud Pública y colaborador en proyectos e informes técnicos en el IMTA.

Areli Gómez Rojas. Licenciada en Biología por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Ha participado en congresos nacionales e internacionales. Tiene experiencia en muestreo de aguas y aguas tratadas para su potabilización. Ha intervenido en proyectos relacionados con desalación de agua mediante el uso de energías no convencionales, remoción de contaminantes específicos y emergentes, y evaluación de productos de desinfección de agua potable.

CONSULTA PÚBLICA PARA LA INTEGRACIÓN DEL PNH 2014 -2018

R. Piña

Resumen

La Comisión Nacional del Agua (Conagua), con la colaboración del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), llevó a cabo un ejercicio de consulta pública para el Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (PNH), con el objetivo de considerar en su elaboración los planteamientos y propuestas de distintos actores sociales e institucionales vinculados con la gestión del agua en el país. Para esto, se desarrolló una guía metodológica que facilitó la obtención de los resultados, la cual se resume en el presente artículo.

Introducción

La Conagua ha iniciado una nueva era de planificación hídrica en México y, de acuerdo con el contexto del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (PND), elaboró el PNH, programa especial con enfoque multisectorial y transversal, que incluye la coordinación de diversas dependencias y los tres órdenes de gobierno para trabajar juntos en su cumplimiento. Para ello, también tiene mucha importancia la participación y consulta de los diversos grupos sociales.

El artículo 20 de la Ley de Planeación indica que: “en el ámbito del Sistema Nacional de

Planeación Democrática tendrá lugar la participación y consulta de los diversos grupos sociales, con el propósito de que la población exprese sus opiniones para la elaboración, actualización y ejecución del Plan y los programas a que se refiere esta Ley”.

Recientemente, el artículo 26 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que: “La planeación será democrática y deliberativa...”

Con base en lo anterior, se reconoce que aún falta mucho por hacer; sin embargo, también se debe reconocer que este trabajo ha sido un buen inicio en el marco de las mejoras que se pretenden hacer al sistema de planificación hídrica en el país. De esta forma, la consulta pública a la que se hace referencia tuvo dos modalidades: una en línea (a través del Internet) y otra presencial, de las cuales, a continuación, se describen los principales resultados.

Resultados

La consulta en línea consistió de 12 preguntas opcionales, relacionadas con los objetivos del PNH:

1. Fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua.

2. Incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones.
 3. Fortalecer el abastecimiento de agua y el acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
 4. Incrementar las capacidades técnicas, científicas y tecnológicas del sector.
 5. Asegurar el agua para el riego agrícola, energía, industria, turismo y otras actividades económicas y financieras de manera sustentable.
 6. Consolidar la participación de México en el contexto internacional en materia de agua.
- Tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales.
 - Evitar asentamientos humanos en zonas inundables.
 - Impulsar la investigación científica y tecnológica en temas del agua.

Por su parte, la consulta presencial planteó la realización de dos tipos de foros: uno de carácter regional y otro nacional.

En el caso de los foros regionales (ilustración 1), se convocó a distintos actores sociales e institucionales vinculados con la gestión del recurso hídrico a cinco reuniones, donde se abordaron los mismos temas asociados con los objetivos del PNH, antes mencionados. Aquí cabe aclarar que aunque el Valle de México estaba originalmente contemplado dentro de la Región Centro Occidente, la Conagua decidió hacer una reunión adicional en Texcoco.

En esta consulta participaron 2 112 personas de toda la república, quienes respondieron a todos los temas. Los temas que respuestas obtuvieron fueron: “Gestión integrada del agua” y “Cultura del agua, ciencia y tecnología”.

Entre las respuestas consideradas como más importantes se encontraron:



Ilustración 1. Zonificación de los principales foros regionales de consulta.

Los lugares en que se realizaron estos foros fueron los siguientes:

- Región Centro Occidente, cuya sede fue Querétaro, Querétaro.
- Región Noroeste, cuya sede fue Culiacán, Sinaloa.
- Región Noreste, cuya sede fue Monterrey, Nuevo León.
- Región Sureste, cuya sede fue Villahermosa, Tabasco.
- Región Valle de México, con sede en Texcoco, Estado de México.

A los foros presenciales asistieron alrededor de 1 000 participantes, en los cuales se siguió la dinámica metodológica determinada ex profeso. Ello permitió lograr el objetivo de recabar las opiniones y pro-

puestas concretas para los problemas planteados (ilustraciones 2 y 3).

Dicha guía metodológica integró los pasos a seguir para la consulta pública en los diferentes foros, considerando: manejo del tiempo, trabajos en grupo y reuniones plenarios, fundamentados en los conceptos de la hermenéutica y el debate dialéctico para, con base en los problemas identificados, formular soluciones. De esta manera, cada asistente en respuesta a una problemática planteada presentó sus propuestas de solución, de acuerdo con el objetivo de cada mesa de trabajo.

Luego, de manera abierta, los participantes dialogaron y reflexionaron sobre las propuestas; las revisaron, agruparon y



Ilustración 2. Mesa de trabajo en los foros de consulta.



Ilustración 3. Sesión plenaria de los foros de consulta.

ordenaron según el grado de importancia bajo la interrogante: “¿Qué tanto contribuye la propuesta para alcanzar el objetivo?”. Así, cada asistente concluyó su participación y un integrante presentó las conclusiones de cada mesa de trabajo en reunión plenaria.

Para los foros especiales, llevados a cabo en la Ciudad de México (ilustración 4), se invitó a personalidades con amplio conocimiento y peso político en las líneas temáticas planteadas por la Presidencia de la República y su correspondencia con los objetivos del PNH, especialmente en cuanto a:

- Agua potable, drenaje y saneamiento.
- Gestión técnica del agua ante sequías e inundaciones.
- Sustentabilidad, gobernanza y seguridad hídrica.
- Agua y seguridad alimentaria.

De esta manera se integraron, de los foros de consulta especiales, 373 propuestas concretas; y de los foros de consulta regionales 648 propuestas. Todas fueron revisadas, ordenadas y analizadas a fin de complementar las estrategias y líneas de acción del PNH, entre las que destacaron, por el número de aportaciones:



Ilustración 4. Sesión de foros especiales de consulta.

- Fortalecer la participación de organizaciones sociales y académicas en la administración del agua.
- Evitar los asentamientos humanos en zonas con riesgo de inundación y reubicar los ya existentes a zonas seguras.
- Crear entes reguladores para los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- Intensificar la tecnificación del riego en los distritos y unidades de riego.
- Promover la educación hídrica y ambiental en las legislaciones estatales.
- Reforzar la relación con organizaciones internacionales líderes en el tema del agua.
- Financiar proyectos hidráulicos con alta rentabilidad social.
- Reforzar la rendición de cuentas en los módulos de riego y con la representación de la Conagua en consejos de vigilancia.
- Crear una estructura para atención de las unidades de riego, similar a la de los distritos de riego.

Conclusiones y recomendaciones

La principal conclusión de este ejercicio es: aun con la complejidad y dificultad que implica organizar este tipo de reuniones, se logró convocar a un buen número de participantes de la sociedad y de diferentes instituciones. De igual forma, la respuesta que se obtuvo a través de página web, considerando su poca difusión y permanencia, fue satisfactoria.

La guía metodológica, como suele suceder en estos casos, se fue ajustando durante el

Asimismo, se pudieron identificar algunas otras líneas de acción novedosas como:

- Simplificar los procesos y programas de apoyo a productores usuarios del agua.

proceso, en función de las características y las condiciones tanto de cada lugar como de los participantes, pero, en general, se mantuvo cierto rigor en su aplicación.

Es importante mencionar que de toda la información captada se pueden generar análisis complementarios, para enriquecer las propuestas sujetas a integrarse de manera más específica en la siguiente actualización del PNH. En especial, la información obtenida vía Internet, tuvo una opción de libre opinión que, finalmente, aporta alternativas adicionales no analizadas con detenimiento.

Por último, se reconoce la necesidad de insistir en la importancia de este tipo de ejercicios de participación social, y que requieren de mayor atención y apoyo por parte de las instituciones de los diferentes órdenes de gobierno, a fin de que poco a poco se cumpla lo ya establecido constitucionalmente: “... la planeación será democrática y deliberativa. Mediante los mecanismos de participación que establezca la ley, recogerá las aspiraciones y demandas de la sociedad...”

Bibliografía

Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (2013). *Diario Oficial de la Federación*, 20 de mayo.

Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (2014). *Diario Oficial de la Federación*, 8 de abril.

Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2014). *Diario Oficial de la Federación*, 10 de febrero.

Procesos de planificación y políticas para formular el Programa Nacional Hídrico 2013-2018 (2013). Informe final del proyecto. Documento de análisis de los resultados de la consulta pública. México: Conagua-IMTA.

Resumen curricular

Ramón Piña Sánchez. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de México (UNAM) (1982) y maestro en Ingeniería (Investigación de Operaciones, Programa de Economía y Finanzas del Agua) por la DEPMI-UNAM, Campus Morelos (1997). Campos de trabajo y especialidad: planeación y evaluación de proyectos y programas del sector hídrico, con énfasis en la participación social; planeación y desarrollo de sistemas de información de apoyo a lo anterior.

PROGRAMAS DE PREVENCIÓN CONTRA CONTINGENCIAS HIDRÁULICAS PARA LOS TRECE ORGANISMOS DE CUENCA DE LA CONAGUA

J. Lafragua, Y. Solís, J. Salgado, A. Bravo, M. Preciado, I. Rivas, E. Aguilar, M.A. Suárez y A. Güitrón

Resumen

Se elaboran trece programas, uno por cada organismo de cuenca de la Conagua, bajo el enfoque de Gestión Integrada de Crecidas, con el objetivo de proponer soluciones orientadas a reducir el riesgo existente ante inundaciones a fin de disminuir daños en zonas urbanas y productivas, anteponiendo, en lo posible, soluciones no estructurales antes de propuestas estructurales. Se determina el riesgo, en términos de daños económicos, en el ámbito nacional y en trece zonas piloto, una por cada Región Hidrológico-Administrativa. El daño para un periodo de retorno de cuarenta años resulta de alrededor de \$179 000 millones. Además, se propusieron factores de reducción de daños basados en experiencias de otros países para tener un indicador cuantitativo de los daños reducidos que se obtienen al aplicar medidas no estructurales, y así percibir su bondad y que sean consideradas en la toma de decisiones con intención de mitigar el riesgo de inundaciones.

Introducción

En épocas recientes se han presentado fenómenos hidrometeorológicos con intensidad inusual que provocan desastres que dañan bienes materiales de la población, infraestructura y zonas productivas. En el país, la magnitud de los daños deja muy claro que a pesar de los esfuerzos realizados para enfrentar estos fenómenos, es necesario trabajar arduamente en las actividades de prevención a fin de que los eventos extremos provoquen los menores daños posibles. La participación del personal técnico con la preparación y el perfil adecuado de los tres niveles de gobierno, es de vital importancia en la elaboración y manejo de la información sobre estos fenómenos. Debido a que en México son escasas las acciones preventivas ante la ocurrencia de una inundación que incluyan la alerta oportuna sobre riesgos por fenómenos hidrometeorológicos extremos, vinculadas con la coordinación institucional, medios de comunicación y a la población en general, los programas de prevención resultan

instrumentos necesarios para planear a corto, mediano y largo plazos estrategias y acciones dirigidas a prevenir o reducir los daños provocados por inundaciones.

Resultados

En cada organismo de cuenca se identificó lo siguiente: causas que originan las inun-

daciones (tabla 1); zonas potencialmente inundables (polígonos de inundación), basadas en el índice de inundación para periodos de retorno de 2, 10, 20, 50 y 100 años, proporcionadas por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); verificación de recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial relacionadas con

Tabla 1. Principales causas que originan inundaciones, por Región Hidrológico-Administrativa.

Causa	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Asentamientos humanos irregulares en zonas inundables y de alto riesgo.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Azolvamiento en cauces y estructuras hidráulicas que reducen el área hidráulica.				✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓
Drenaje insuficiente o inexistente (suelos de baja permeabilidad, topografía plana, etc.).	✓	✓		✓	✓	✓	✓				✓		
Alta vulnerabilidad ante los ciclones tropicales y efectos de la marea de tormenta.		✓	✓					✓	✓		✓	✓	
Obras de protección mal construidos o deteriorados.		✓		✓			✓	✓		✓	✓		
Escaso mantenimiento y/o rehabilitación de la infraestructura para control de avenidas.					✓		✓	✓		✓		✓	✓
Cambio de uso de suelo.			✓	✓		✓							✓
Deficiencias en los sistemas de pronóstico de avenidas y sistemas de alerta temprana.				✓			✓			✓			
Deficiente medición hidrométrica y climatológica.							✓		✓	✓			
Falta de obras de protección a centros de población con mayor grado de vulnerabilidad.				✓			✓			✓			
Hundimientos, grietas y accidentes geológicos.													✓

la cantidad de estaciones meteorológicas e hidrométricas; obras de control de avenidas existentes y revisión de la existencia de sistemas de alerta temprana.

Se estimó el riesgo, en términos de daños económicos, en el país y en trece zonas piloto, utilizando la metodología del Sistema de Análisis y Visualización de Escenarios de Riesgo (SAVER) del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) en zonas urbanas, incorporada en el módulo Atlas Nacional de Riesgo por Inundación (ANRI).

El procedimiento fue el siguiente:

1. Delimitación de la zona de inundación.
2. Definición de la probabilidad de ocurrencia del evento (inverso del periodo de retorno), para los cuales será evaluado el daño.
3. Cálculo de los tirantes de inundación, así como velocidad y severidad, con base en un modelo hidrológico-hidráulico, para cada uno de los periodos de retorno seleccionados.
4. Selección de curvas de daño (urbanas, agrícolas, etcétera), mismas que relacionan tirante o duración de la inundación con los daños económicos.
5. Con base en las curvas de daño, las características socioeconómicas en la zona de estudio y el tirante alcanzado en la inundación para cada evento de periodo de retorno asociado, se calculan los daños económicos.
6. Determinación del daño anual esperado (DAE).

Los insumos para la evaluación del riesgo en el ámbito nacional y zona piloto fueron:

- a. Polígono que delimita la zona de inundación. Es el área donde se estimarán los daños.
- b. Modelo digital de elevaciones usado por el programa de cómputo Análisis de Riesgos de Inundación (ANRI-PC). Es el continuo de elevaciones escala 1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), con una resolución de 50 x 50 m, utilizado para las zonas piloto. El ANRI-PC tiene integrado el modelo SRTM (Shuttle Radar Topography), de cobertura mundial, publicado por el Instituto de Tecnología de California, cuya resolución más aproximada es de 90 x 90 m, usado para estimaciones de daños en viviendas para el modo de procesamiento por lotes.
- c. Áreas geoestadísticas básicas (AGEB). Constituyen la unidad básica del Marco Geoestadístico Nacional. De las AGEB urbanas, se obtiene el conjunto de índices de marginación existentes en la zona de inundación.
- d. Tirante y velocidad, estimados con base en modelos hidrológico-hidráulico en formato raster para varias probabilidades.
- e. Curvas de daños. Curvas que relacionan características de la inundación (por ejemplo tirante y duración) con los daños en pesos. Pueden ser de tipo urbano y agrícola. En este programa las curvas utilizadas corresponden a daños en viviendas, publicadas por Baró et al. (2007 y 2011), quienes calcularon el valor del daño con base en el costo de cada bien, obteniendo así el valor en pesos de los daños económicos para cada altura de lámina

de agua alcanzada y para cada una de las AGEB presentes en la zona de inundación.

Los resultados se muestran en la tabla 2, donde se observa que el daño asociado a un periodo de retorno de cuarenta años resulta de alrededor de \$179 000 millones. Asimismo, para cada organismo de cuenca se dispuso de un polígono de inundación-cuenca piloto (ilustración

1), con sus respectivas alturas de agua, producto de la modelación hidrológica-hidráulica realizada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para los mismos periodos de retorno ya mencionados, con lo cual se estimó su respectivo DAE (tabla 2), aplicando el procedimiento descrito anteriormente.

Dentro de las limitantes de los insumos utilizados en la estimación del daño nacional,

Tabla 2. Daños estimados a escala nacional y por cuenca piloto.

Región Hidrológico-Administrativa		Daño* millones de \$	Cuenca piloto	DAE** millones de \$
Clave	Nombre			
I	Península de Baja California	1 476	Rosarito-Huahuatay	41
II	Noreste	1 333	Mátape-Empalme	1 189
III	Pacífico Norte	1 331	Durango	1 003
IV	Balsas	595	Yautepec	34
V	Pacífico Sur	422	Río Sabana	867
VI	Río Bravo	3 643	Río Sabinas	10
VII	Cuencas Centrales del Norte	1,091	Río Nazas	1 091
VIII	Lerma Santiago Pacífico	7 863	Río Pedregal	5
IX	Golfo Norte	990	Tempoal y Moctezuma	75
X	Golfo Centro	2 269	Río Papaloapan	499
X	Frontera Sur	11 326	Río Grijalva	429
XII	Península de Yucatán	6 801	Río Palizada	6
XIII	Aguas del Valle de México	140 193	Valle México	1 261
Total nacional		179,333		

* Para un periodo de retorno de 40 años.

** Considerando 2, 10, 20, 50 y 100 años de periodo de retorno.

se encuentra el modelo digital de elevación STRM, con resolución de 90 x 90m (de radar), baja cobertura de AGEB y evaluación de daños sólo en viviendas (menaje).

Una vez estimados los daños económicos, se integran los proyectos que cada Dirección Local de la Conagua tiene contemplados como posibles soluciones estructurales, los cuales se agrupan y presentan en la ilustración 2. Sin embargo, los recursos económicos limitan el número de obras a realizar, es por eso que se proponen los FRD para percibir su bondad en términos cuantitativos y comiencen a tomar relevancia en la toma de decisiones, a fin de mitigar el riesgo de inundaciones. Estos factores se basan en estudios de caso, principalmente en países europeos: Italia, Alemania, España, Inglaterra, Escocia y Austria, así como en Colombia, descritos en Schanze et al. (2008), Escuder et al. (2010), Jöbs et al.

(2011) y Campos et al. (2012). En la tabla 3 se muestra la propuesta de factores y, en la ilustración 3, los resultados al aplicarlos en cinco zonas piloto.

Conclusiones

- La estimación del DAE es esencial para determinar el nivel adecuado de protección contra inundaciones.
- La modelación hidráulica por cuenca es necesaria para poder evaluar adecuadamente los daños.
- La evaluación de la reducción de daños por medidas no estructurales requiere de mayor análisis. Sin embargo, es prioritaria la evaluación de la eficacia de aquellas que están actualmente operando, tales como los sistemas de alerta temprana en Chiapas, Guerrero y Quintana Roo, entre otros.

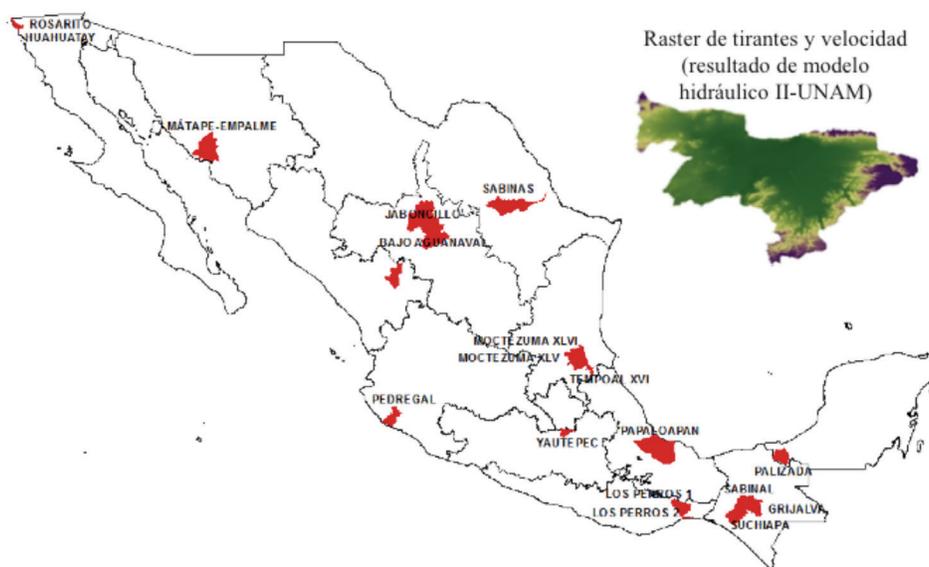


Ilustración 1. Ubicación de las cuencas piloto.

Acciones para control de inundaciones

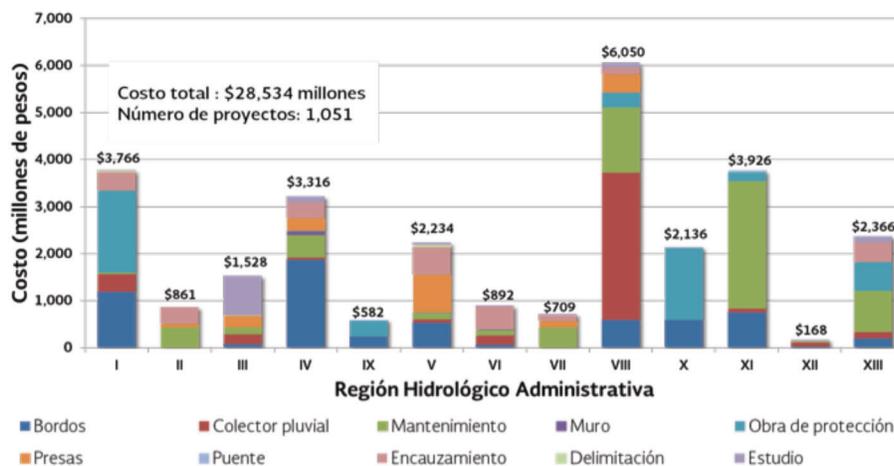


Ilustración 2. Soluciones estructurales.

Tabla 3. Factores de reducción de daños propuestos.

Medidas no estructurales	Niveles de severidad				
	Peligro Alto		Peligro Medio		Peligro Bajo
	A	B	C	D	E
Monitoreo y vigilancia de variables hidrometeorológicas.	1%	5-10%	10-20%	30-40%	40-50%
Pronóstico de avenidas y sistemas de alerta temprana.					
Medidas de protección civil.					
Medidas de ordenación territorial y urbanismo.	75%	70%	50%	0%	0%
Medidas para propiciar la participación social en la formación de una cultura de prevención contra inundaciones.					
Marginación Alta.	1%	15%	30%	30%	30%
Marginación Media y Baja.	1%	60%	70%	70%	70%
Promover el aseguramiento frente a inundaciones sobre personas y bienes.					

Marginación Alta.	1%	60%	60%	60%	60%
Marginación Media y Baja.	1%	40%	40%	40%	40%
Medidas para mejorar la gestión de crecidas.					
Marginación Alta.	1%	50%	60%	65%	65%
Marginación Media y Baja.	1%	70%	80%	85%	85%

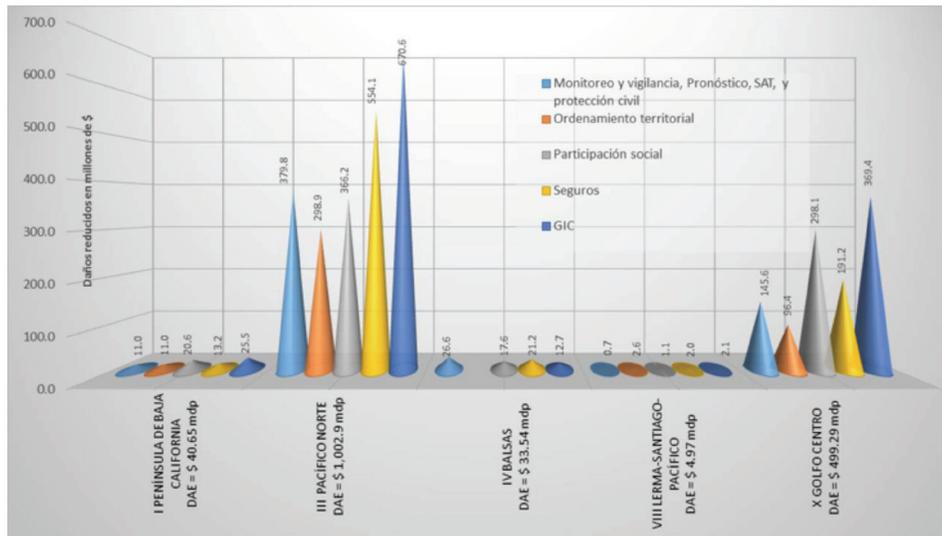


Ilustración 3. Daños reducidos por medida no estructural en cinco cuencas piloto.

- Se requiere la elaboración de curvas de daños agrícolas y a la infraestructura para incluir, en lo posible, todos los daños.

Referencias

Baró S. J. E., Díaz, D. C. y Esteller A. M. V. (2007). Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte I: propuesta metodológica. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(1), 91-102.

Baró S. J. E., Díaz D. C., Calderón G., Cadena E. y Esteller A. M. V. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 201-218.

Campos et al. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Banco Mundial.

Escuder et al. (2010). *Full SUFRI Methodology Report. SUFRI-WP3-Riesgo residual y análisis de vulnerabilidad*. (Versión bo-

rrador). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Jöbstl et al. (2011). *SUFRI-Sustainable Strategies of Urban Flood Risk, Management with Non-Structural Measures to Cope with the Residual Risk*. CRUE Final Report II-6.

Schanze et al. (2008). *Systematisation, Evaluation and Context Conditions of Structural and Non-Structural Measures for Flood Risk Reduction*. Flood-ERA Join Report, ERA-NET CRUE.

Resumen curricular

Jaqueline Lafragua Contreras. Maestra en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (1996).

Yolanda Solís Alvarado. Maestra en Ciencias por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (1996).

Jorge Salgado Rabadán. Maestro en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (2013).

José Avidán Bravo Jácome. Maestro en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (2006).

Margarita Preciado Jiménez. Maestra en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (2002).

Iván Rivas Acosta. Doctor en Planeación de Recursos Hidráulicos por la Colorado State University, Fort Collins, EUA, 2009.

Ernesto Aguilar Garduño. Maestro en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (1995).

María de los Ángeles Suárez Medina. Maestra en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México (1995).

Alberto Güitrón de los Reyes. Maestro en Ciencias por la Universidad de Arizona, EUA (1976).

LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) COMO HERRAMIENTA PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS Y DISPOSITIVOS DE INTERÉS AGRÍCOLA

J. Flores, W. Ojeda y M. Íñiguez

Resumen

Un modelo se considera como una fracción de la realidad. Una vez validado, puede simular un proceso bajo condiciones específicas de inicio y/o contorno. La simulación numérica de procesos es una herramienta básica en ingeniería, útil en la toma de decisiones y en la gestión y administración de recursos e insumos, pero además, con fines de diseño e innovación. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta de simulación que permite la modelación numérica basada en la solución de ecuaciones que describen el comportamiento de un fluido en movimiento. En ingeniería agrícola, varios procesos involucran el flujo de fluidos y, en consecuencia, son susceptibles de ser modelados con CFD. A escala planta, por ejemplo, la transpiración es un proceso físico del cual es posible construir un modelo con las ecuaciones que gobiernan el transporte de agua y su cambio de fase, a partir de condiciones iniciales y de entorno conocidas. Un ambiente cerrado como un invernadero, una mallasombra o una granja pecuaria son biosistemas cuyo interior ha sido simulado mediante CFD. Derivado de

estos análisis, es factible observar la dinámica del aire en forma espacial y así facilitar la gestión y mejorar su manejo y eficiencia. En ingeniería de riego, el diseño de emisores de riego, válvulas y estructuras de aforo y otros dispositivos han debido pasar por un proceso de simulación para mejorar las eficiencias y uniformidades antes de ser comercializados. En este trabajo, se exponen casos específicos de modelación de sistemas y dispositivos de interés agrícola, y se muestran los resultados usando CFD.

Introducción

Un problema asociado al uso de modelos matemáticos mecanicistas o agregados de interés agrícola, basados en balances de energía y masa, es que suponen un ambiente homogéneo del medio que se simula. Sin embargo, un monitoreo más realista refleja una variabilidad no sólo espacial, sino también temporal de las variables de interés. Por ejemplo, en un ambiente semicerrado, cuando se estudian las tasas de ventilación, generalmente no se distingue entre el movimiento del aire dentro y fuera del espacio ocupado por las plantas. Para solucionar

este problema, se ha optado por considerar las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos. El conjunto de métodos numéricos empleados para obtener soluciones computacionales de estas ecuaciones, junto con el arte de modelar, se denomina “dinámica de fluidos computacional” (CFD). Esta CFD trata los valores de las variables dependientes como incógnitas primarias en un número finito de lugares o puntos; entonces, un conjunto de ecuaciones algebraicas se deriva a partir de las ecuaciones fundamentales aplicadas al dominio y se resuelven mediante algoritmos numéricos preestablecidos (Anderson, 1997).

Aplicación de CFD a sistemas de interés agrícola

En el área agrícola, la aplicación de herramientas numéricas ha sido de gran apoyo para el diseño y operación de dispositivos y componentes agrícolas. Algunas de estas aplicaciones y su problemática se describen a continuación.

Agricultura protegida

El sector hortícola es uno de los principales componentes de la economía en varias regiones de México. El jitomate es el principal producto hortícola de exportación. Se considera que representa un poco más del 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas, y el 16% del valor total de las exportaciones agropecuarias, sólo superadas por las exportaciones de ganado vacuno (Aserca, 1995). A pesar de las ventajas sustanciales de México para la producción de hortalizas, tal como adecuadas condiciones medioambientales y la cercanía del mercado estadounidense, aún permanecen problemas de manejo y con-

trol que reducen la calidad del producto y dificulta su competencia en los mercados mundiales, cada vez más globalizados.

Los primeros trabajos del análisis de invernaderos usando CFD fueron reportados por Okushima et al. (1989), los cuales se mejoraron y de ahí derivaron las aplicaciones actuales. Al tener un ambiente confinado, el invernadero está condicionado a los cambios ambientales locales, lo que desde el punto de vista agronómico exige un control ambiental complementario para mantener este ambiente en la zona de confort del cultivo. Al hacerlo, también se mejora su diseño, tal como orientación, dimensiones y, sobre todo, el sistema de ventilación, de acuerdo con el tamaño, posición y forma de las ventanas (Flores et al., 2014).

Instalaciones agropecuarias

Cuando se define la zona de confort ambiental, ésta es independiente del tipo de habitante, planta o animal, ya que todos requieren de un ambiente óptimo para alcanzar su potencial productivo. El establecimiento del tipo de habitante puede ser diferente; por ejemplo: las plantas están fijas en el suelo y las especies pecuarias (vacuno, cunícula, etcétera) son semovientes, pero en ambos casos el ambiente interior está supeditado a las características físicas de la estructura para facilitar o confinar el movimiento de los fluidos.

En una instalación pecuaria hay elementos extras que pueden ser analizados con apoyo de la CFD. Por ejemplo, en una granja de conejos el sistema de ventilación no sólo provee un mejor clima, sino que a su vez puede ser un factor limitante cuando las heces del conejo producen una bacte-

ria que, al degradarse, emite gases tóxicos como el amoníaco. Con ello, se incrementa la mortandad, en especial cuando la temperatura aumenta (verano). El análisis con la CFD para una instalación pecuaria de conejos fue analizada por Flores et al., (2013).

Biodigestores

La producción de gases contaminantes de explotaciones pecuarias es un importante contribuidor de emisores de gases de efecto invernadero. El uso de dispositivos (biodigestores) que degraden las excretas pecuarias no sólo aporta el beneficio directo al disminuir la contaminación ambiental, sino trae, además, la generación de combustible útil que puede ser utilizado en otros procesos energéticos. Mediante la CFD se pueden analizar los procesos de diseño, dimensionamiento y de mezcla indispensables en la degradación y reúso de gases de origen pecuario.

Estructuras hidráulicas

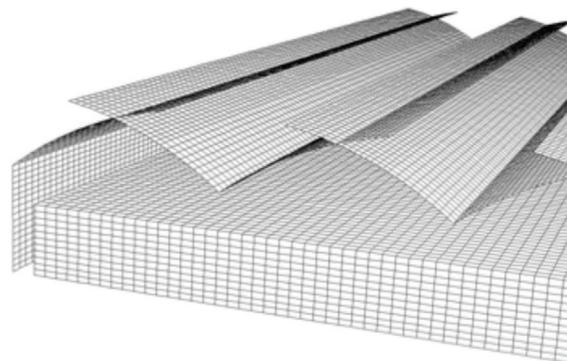
La visualización de los flujos en regímenes transitorios, en conductos cerrados o abiertos, es una de las mayores ventajas

de esta herramienta. Aun cuando la CFD debe asumir hipótesis sobre el fluido y el flujo, el análisis experimental de este tipo de estructuras indica un similar comportamiento de los flujos simulados con la CFD, tanto con sistemas instrumentales de medición como los representados con Particle Image Velocimetry (PIV), modelos a escala, etcétera.

Entre los problemas que pueden ser tratados mediante la CFD, se encuentra el diseño de dispositivos de medición y control volumétrico. En goteros, el análisis de la eficiencia de caudal es básico. En sistemas de inyección, se combinan problemas de precisión en la inyección con la pérdida de carga. En dispositivos de entrega volumétrica de interés parcelario, tal como aforadores, interesa que la variación en flujo deba ser mínima (Iñiguez et al., 2014).

Resultados

La CFD ha sido ampliamente usada en agricultura protegida, de donde evolutivamente se ha pasado de la validación de modelos simples a la aplicación para el análisis, gestión y diseño en condiciones cada vez



**Ilustración 1. Invernadero (a),
analizado con un modelo computacional con discretización espacial en 3D (b).**

más complejas. El análisis se hace asumiendo el flujo de aire circulando en un conducto cerrado (invernadero), el cual es construido y discretizado en un número finito de elementos (ilustración 1), en los cuales se aplican las ecuaciones que gobiernan el flujo. La solución del problema permite tener una distribución espacial del aire y sus propiedades.

La ilustración 2 muestra la distribución espacial de velocidad y dirección del viento y su respectivo de temperatura en un invernadero cenital de diez naves. Los resultados indican que en invernaderos multimodulares la apertura de ventanas laterales y cenitales, al igual que el riego y los fertilizantes, son susceptibles de gestionarse para definir el momento oportuno de su aplica-

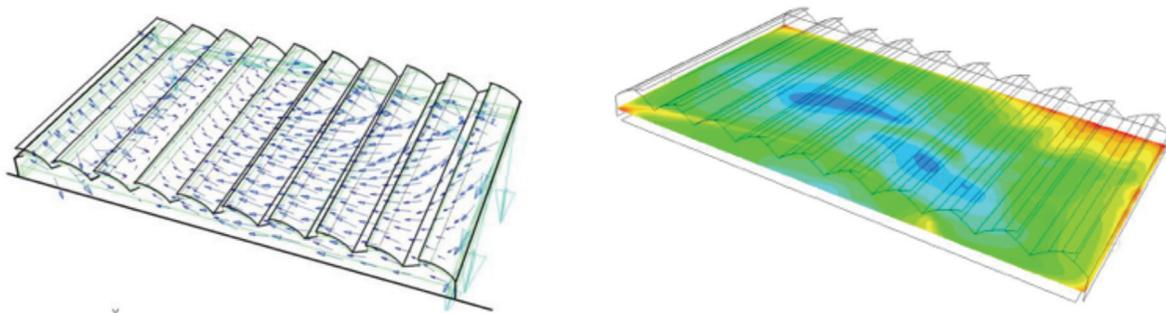


Ilustración 2. Vectores de velocidad $m s^{-1}$ (a) y perfiles espaciales de temperatura (K) del invernadero analizado (b).

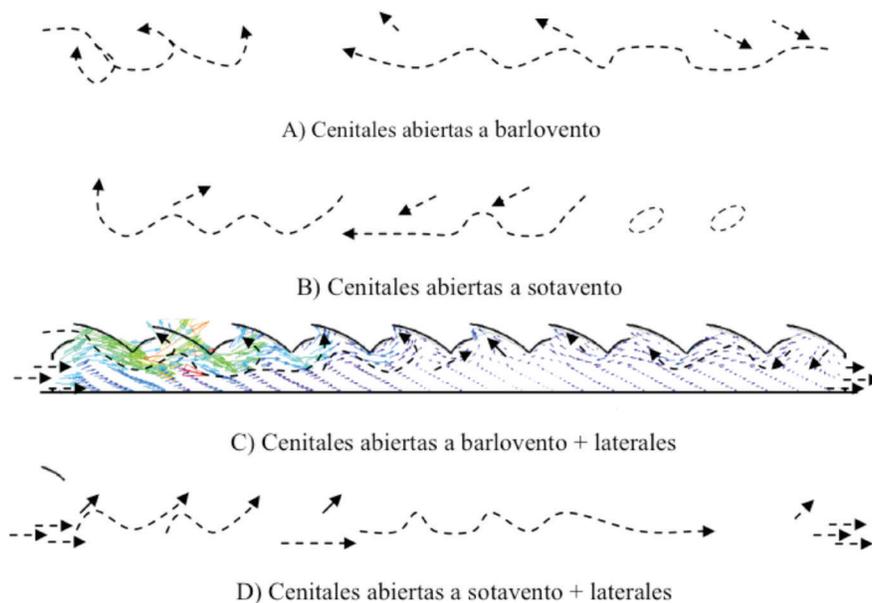


Ilustración 3. Análisis de la importancia relativa de la apertura de las ventanas laterales y cenitales en función de longitud.

ción. Si el invernadero es menor a 40 m, la ventana lateral tiene mayor importancia que la cenital, y funciona principalmente como salida de aire. Si el invernadero aumenta de longitud (mayor a 50 m), las ven-

tanás cenitales cobran mayor importancia al funcionar tanto como entrada y salida de aire, y en consecuencia, su apertura y orientación debe ser gestionada con mayor cuidado (ilustración 3).

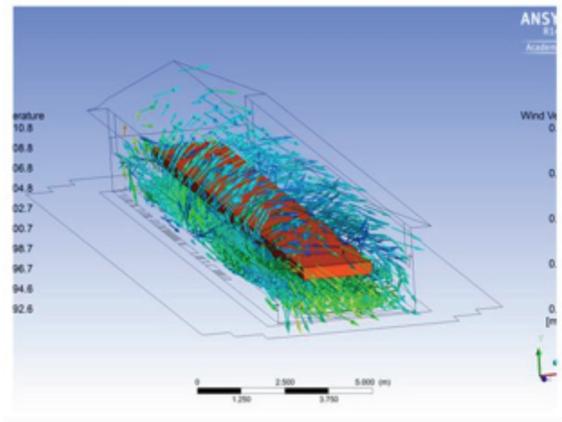


Ilustración 4. Ventilación en una granja de conejos (a), analizada con la CFD (b).

En una explotación agropecuaria, el diseño de los espacios donde habitan animales ha sido también objeto de modelación. Específicamente, en una granja de conejos,

la densidad y arreglo de las jaulas es un factor decisivo en la eficiencia de producción. Mediante la CFD se ha propuesto que la mejor orientación de la granja debe ser

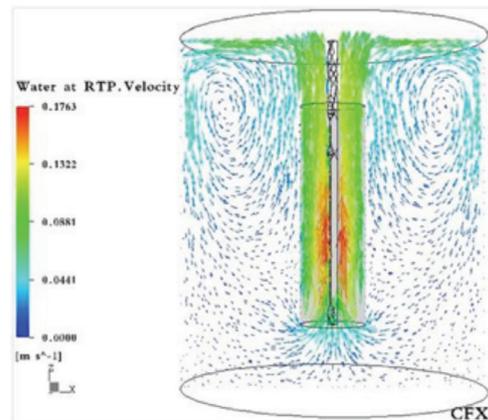
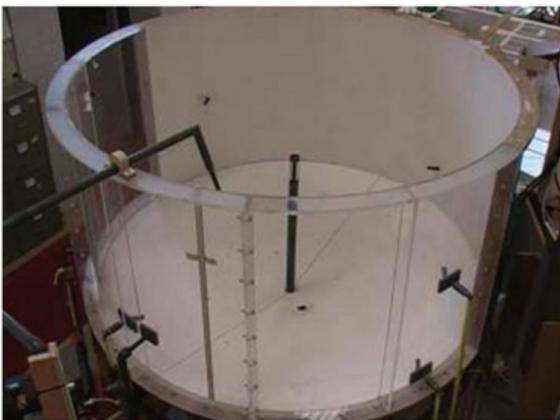


Ilustración 5. Análisis de un mezclador (a) como biodigestión y su modelo CFD (b).

perpendicular a los vientos dominantes, y la colocación de las ventanas debe ser a diferentes alturas: menor altura a la entrada que a la salida, tal como se presenta en la ilustración 4.

En términos de equipos para degradar y aprovechar los desechos pecuarios, la CFD ha permitido analizar a detalle el proceso

de mezcla y, con ello, plantear hipótesis para hacer eficiente el proceso. La combinación de mezcla se recomienda en una proporción de 1:3 entre el solvente (agua) y el degradante (estíercol) (ilustración 5).

En cuanto a dispositivos de medición y control volumétrico, existen experiencias en la literatura. En emisores para microi-

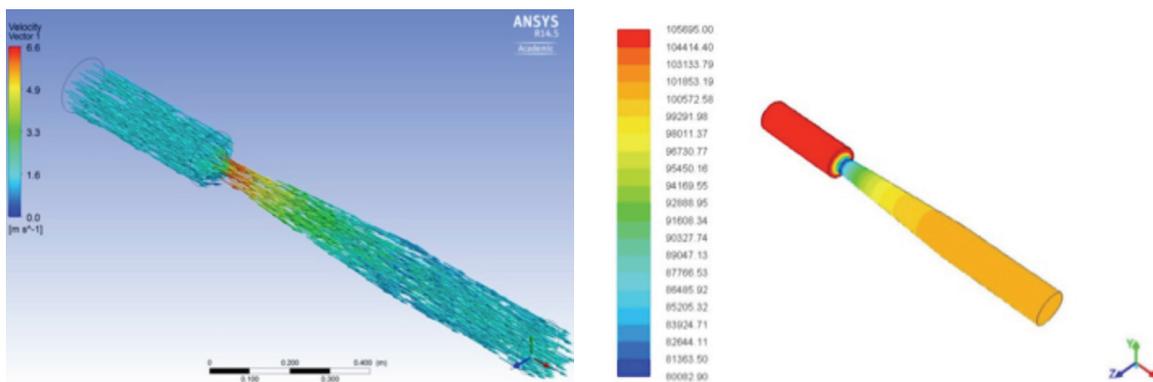


Ilustración 6. Vectores de velocidad m s-1 (a) y distribución espacial de presiones en un dispositivo Venturi (Pa) (b).

rigación se han analizado y mejorado: los sistemas antisifón, antidrenaje y autocompensados, extendiendo esto a líneas regantes que permiten un control preciso en el riego y, así, un incremento en la eficiencia de aplicación.

Un dispositivo Venturi fue analizado desde el punto de vista de funcionamiento hidráulico y mejorar la inyección de una solución nutritiva, tratando de aprovechar al máximo la contracción para definir la carga máxima que se genera y la suficiencia para que ocurra la succión (ilustración 6).

Conclusiones y recomendaciones

La modelación del flujo de fluidos de interés agrícola es una herramienta para mejorar el diseño, gestión y administración de recursos e insumos de biosistemas para la producción agropecuaria.

La CFD aporta una visualización detallada de las variables de interés del proceso que se modela, lo que facilita la comprensión y análisis de los procesos que se simulan.

Las condiciones internas y externas juegan un papel importante para generar condi-

ciones óptimas del desarrollo de organismos de interés agrícola, por lo que el uso de herramientas de modelación, como la CFD, permite estudiar condiciones iniciales y de entorno contrastantes con fines de análisis del desempeño ambiental y operacional de biosistemas de producción agropecuaria.

Bibliografía

- Anderson, J. D. (1997). *Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications*. USA: Mc. Graw-Hill.
- Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (Aserca) (1995). El jitomate mexicano. Un complemento del mercado estadounidense. *Claridades agropecuarias*. 25, 3-21.
- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Lara-Mireles, J. L., Montero, J. I. y Rojano, F. (2013). *Climate Behavior of a Rabbit Barn in Central Mexico by using CFD*. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Flores-Velázquez, J., López-Cruz, L., Mejía-Saenz, E., & Montero-Camacho, I. (2014). Climate Performance Evaluation of a Greenhouse in Central Mexico using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Agrocien- cia*, 48(2), 131-146.
- Íñiguez, M., Flores-Velázquez, J., Ojeda, W., Mercado, R. y Díaz, C. (2014). Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD). Enviado a: *Tecnología y Ciencia del Agua*.
- Okushima, L., Sase, S., Nara, M. (1989). A Support System for Natural Ventilation Design of Greenhouses based on Compu-

tational Aerodynamics. *Acta Hortic.*, 284, 129-136.

Resumen curricular

Jorge Flores Velázquez. Ingeniero agrónomo especialista en Irrigación por la Universidad Autónoma Chapingo, maestro en Hidrociencias por el Colegio de Postgraduados y doctor en Agricultura Protegida por la Universidad de Almería, España (2010). Líneas de investigación: ingeniería de riego, agricultura protegida, CFD aplicada a la ingeniería agrícola. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y especialista en hidráulica en la Coordinación de Riego y Drenaje.

Waldo Ojeda Bustamante. Ingeniero agrónomo especialista en Irrigación por la Universidad Autónoma Chapingo (1983), maestro en Hidrociencias por el Colegio de Postgraduados (1986) y doctor en Ciencias de Suelo y del Agua por la Universidad de Arizona (1996). Líneas de investigación: ingeniería de riego, agrometeorología y cambio climático. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y subcoordinador de Ingeniería de Riego

Mauro Íñiguez Covarrubias. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Zacatecas (1979), maestro en Hidrociencias por el Colegio de Postgraduados (1997) y doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma del Estado de México (2007). Líneas de investigación: modelación de sistemas y dispositivos de interés hidráulico. Es especialista en hidráulica en la Coordinación de Riego y Drenaje.

DICTAMEN TÉCNICO, FINANCIERO, ECONÓMICO Y LEGAL SOBRE EL ESTADO ACTUAL DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL, BAJO LA OPERACIÓN DE FONATUR

C. A. Servín, G. Mantilla, L. Sandoval, A. C. Tomasini, F. Pozo, E. B. Estrada,
A. Ramírez, E. Ramírez, M. A. Garzón y R. Romero

Resumen

En apoyo a las acciones que el Fondo Nacional de Fomento al Turismo (Fonatur) realiza para la conservación y desarrollo de los Centros Integralmente Planeados (CIP), el IMTA llevó a cabo el diagnóstico técnico, legal y financiero de 13 plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en Cancún, Quintana Roo; San José del Cabo y Loreto, Baja California Sur; Ixtapa, Guerrero; Huatulco, Oaxaca y Litibú, Nayarit. Como resultado del diagnóstico técnico, se elaboraron las recomendaciones para mejorar la operación e incrementar la eficiencia de tratamiento de las plantas. Al revisar la situación jurídico-administrativa, se propusieron las acciones legales para regularizar las condiciones de operación ante las diferentes instancias gubernamentales. El diagnóstico financiero implicó, además de estimar los costos de operación y mantenimiento, revisar la viabilidad financiera de las acciones de mejora técnica propuestas, analizar las políticas de cobro por el servicio de tratamiento y el precio de venta de agua tratada, para lo cual se desarrolló un

programa de cómputo. Se recomendaron precios de tratamiento y de venta de agua tratada por municipio, y se propuso un esquema de subsidios cruzados entre los CIP. Este estudio se completó con una revisión del impacto hacia el entorno social y ambiental.

Introducción

El decreto de creación del Fonatur señala, entre sus funciones: crear y consolidar desarrollos turísticos y ejecutar obras de infraestructura y urbanización, así como edificaciones e instalaciones que permitan la oferta de desarrollos turísticos en los que se preserve el equilibrio ecológico (artículo 44 fracciones II y IV de la Ley General de Turismo). Los CIP, administrados por FONATUR, con reconocimiento internacional son: Cancún, Los Cabos, Huatulco e Ixtapa. Fonatur está consciente que el éxito de los destinos turísticos de alto nivel se debe al reconocimiento de su calidad ambiental y entorno ecológico, belleza y limpieza de sus aguas y calidad de los servicios.

En 2012, Fonatur decidió explorar la posibilidad de desincorporar sus plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Este proceso se concibió como la transferencia de las PTAR hacia la iniciativa privada, lo cual requería de un dictamen técnico, financiero, económico y legal sobre el estado de las PTAR para analizar la viabilidad de concesionar su operación y mantenimiento, bajo el esquema de Contrato de Prestación de Servicios u otra figura jurídica análoga. Asimismo, en el caso de que ello aplicara, establecer las bases que permitieran desarrollar los proyectos necesarios para la rehabilitación y conservación a fin de otorgarlas, posteriormente, en concesión.

Para el desarrollo de este proyecto se conformaron diversos equipos, los cuales abordaron los tópicos técnico, financiero, legal, ambiental y social. Se realizaron visitas técnicas a los CIP para hacer un reconocimiento de las condiciones de las instalaciones y su entorno, y recabar información documental.

El equipo legal revisó el estado jurídico de las concesiones federales, relacionadas con el tratamiento de aguas residuales y sus permisos de descarga, así como las condiciones que deben prevalecer para poder, en su caso, desincorporar las PTAR. La revisión abarcó los aspectos jurídicos estatales y municipales, condiciones en las cuales el municipio puede otorgar la concesión del tratamiento de las aguas residuales a un tercero, así como la ley de obra pública, entre otras.

El equipo técnico, para determinar los principales factores limitantes de desempeño, monitoreó la calidad del efluente de cada PTAR y efectuó siete muestreos de 24 ho-

ras en cada una de las instalaciones para caracterizar el influente y el efluente, tomando en consideración parámetros que se contemplan en la NOM-001-SEMAR-NAT-1996. Asimismo, se hicieron recorridos para observar el estado de funcionamiento y la vida útil esperada en cada instalación.

El equipo financiero recabó información contable, así como de consumos y del destino de las descargas y de la venta del agua residual tratada. Para procesar la información desarrolló un programa en hoja de cálculo, el cual, además de estimar el costo de tratamiento, permite establecer tarifas de cobro tanto para la venta de agua residual como para el cobro por el servicio de tratamiento de aguas residuales. Este mismo programa cuenta con un módulo para realizar la evaluación financiera de futuras inversiones.

El equipo social entrevistó funcionarios de Fonatur, de los ayuntamientos, así como a organizaciones no gubernamentales y algunos ciudadanos vecinos a las PTAR, para averiguar su percepción de aceptación o rechazo hacia las condiciones de operación.

Por último, desde la perspectiva ecológica, se observó el efecto hacia el entorno de las descargas de agua tratada o su reúso. En este contexto, se utilizó de apoyo la calificación que el Programa Playas Limpias asigna a aquellas cercanas al entorno de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Resultados

Los resultados más relevantes fueron:

- Diagnóstico técnico: integración de una memoria fotográfica y su eva-

luación para cada planta de tratamiento. En general, se detectó que las 13 PTAR están subutilizadas, pero la mayoría cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996; inexistencia de memorias de cálculo y manuales de operación; carencia de equipo para control de proceso y falta capacitación del personal. Se identificaron los equipos obsoletos o en mal estado y la infraestructura civil con problemas de corrosión. Se propusieron las acciones para su rehabilitación y se elaboró el presupuesto correspondiente.

- Dictamen jurídico: se realizaron las propuestas de acción para regularizar las condiciones jurídico-administrativas de cada CIP, dentro de las cuales, además de regularizar las concesiones con Conagua, se recomendó realizar los acuerdos con los municipios para obtener la concesión de prestación de servicios de tratamiento de agua residuales.
- Diagnóstico financiero: se elaboró un programa de cómputo que permite estimar los costos de tratamiento en cada planta y por CIP, y evaluar futuras inversiones y analizar políticas de cobro.
- Diagnóstico de percepción social respecto al desempeño de FONATUR: en cada CIP, en general, fue positivo por parte de la población fija.
- En la revisión del impacto ambiental de las descargas de agua residual, se encontró el cumplimiento de los parámetros asociados con el Programa Playas Limpias, aplicado por la Semarnat y, en algunos casos, con certificado de reconocimiento.

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con su decreto de creación, Fonatur está legalmente obligado a conservar el entorno de los CIP que administra. Este mandato lo limita para transferir las plantas a particulares obligándolo por ley, en todo caso, a entregarlo al municipio, único facultado constitucionalmente para realizar la tarea de saneamiento y, por lo mismo, a conceder concesiones a particulares. La experiencia de Fonatur de entregar las PTAR al municipio ha sido desafortunada. En algunos casos, ha obligado a Fonatur a retomar la administración de las plantas para volverlas a hacer funcionar adecuadamente, ya que los municipios no otorgan el mantenimiento adecuado a las instalaciones. En todo caso, se recomendó que después de regularizar su situación jurídica ante el municipio, obtenga la concesión para dar servicio público urbano y, con ello, tener la posibilidad de cobrar por el servicio de tratamiento de agua residual.

Con excepción de la PTAR Nopoló, las PTAR son instalaciones con más de diez años de operación, por lo que requieren de mantenimiento mayor, aspecto que se puede aprovechar para emprender acciones de mejora técnica, tanto estructurales como las recomendaciones para incrementar la eficiencia del tratamiento.

Dadas las características de la actividad turística, de ser una gran demandante de agua aunado a su ubicación en zonas de poca precipitación o durante la época de estiaje, se ha generado la oportunidad de reutilizar el agua residual tratada, principalmente, para riego de jardines y campos de golf de los CIP. A fin de lograr la autosuficiencia financiera de las PTAR se re-

comendó, además de ampliar la venta de agua tratada, cobrar por el servicio de tratamiento de agua residual y procesar los lodos para la venta de composta.

En el análisis financiero se encontró que los CIP Cancún y Los Cabos tienen capacidad para ser autofinanciables; Zihuatanejo y Hualulco se encuentran en situación en la que recuperan parte de los costos, con potencial de ser autosuficientes, mientras que Loreto y Litibú, por operar a menos del 50% de su capacidad, son plantas cuya operación es onerosa. El subsidio cruzado entre CIP puede ser un instrumento que permita dar viabilidad financiera a la operación de las PTAR en su conjunto y, con ello, garantizar la conservación ambiental de los sitios turísticos.

Un indicador que debe perseguir Fonatur es la obtención del certificado “Playa Limpia”, para calificar o medir el buen desempeño de la operación de las PTAR a su cargo. Además, se hicieron observaciones para el manejo de riesgos en la práctica del uso y la manipulación de los reactivos utilizados en las plantas.

Bibliografía

- Ley de Aguas Nacionales, leyes estatales y municipales relacionadas con el agua.
- Moeller, G. et. al. (2011), *Tratamiento de aguas residuales*. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Programas de apoyo de la Conagua.
- Ramírez A. (2012), *Evaluación de plantas de tratamiento*. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Resumen curricular

Carl Anthony Servín Jungdorf. Ingeniero minero metalurgista por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (1976). Tiene posgrado en Explotación de Minas por el Instituto Nacional Politécnico de la Lorena, Francia (1981). Desde 1983 es profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y, de 1989 a la fecha, es especialista en hidráulica en el IMTA, en el área de economía y finanzas del agua. Ha publicado 38 artículos, dos manuales, dos prontuarios y dos capítulos en libros.

ELABORACIÓN DE ESTUDIOS, PROYECTO EJECUTIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO Y PREVENCIÓN DE FALLA ESTRUCTURAL EN LA RAMPA Y TÚNEL DEL VADO DE ATEMAJAC, UBICADO EN LA LÍNEA 1 DEL TREN ELÉCTRICO URBANO, GUADALAJARA, JALISCO

G. Salgado, J. Avilés y R. Álvarez

Resumen

El objetivo del proyecto consistía en elaborar los estudios y el proyecto ejecutivo para resolver la problemática de filtraciones e inestabilidades del subsuelo existente bajo la rampa y túnel, en el cruce con el vado de Atemajac de la línea 1 del Sistema del Tren Eléctrico Urbano de la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

Para ello, se revisaron estudios relacionados, ya que durante más de treinta años existe la problemática. Asimismo, se ejecutaron estudios geotécnicos complementarios y se analizó en forma exhaustiva la información obtenida.

Considerando que el tipo de cimentación de la estructura es sobrecompensada, en

esencia no se trata de falta de capacidad de carga del suelo. Por lo anterior, se revisaron las diversas técnicas de densificación de suelo existentes, en general: por compactación, inclusiones, inyecciones.

La conclusión final del análisis de la información mostró que las alternativas de solución eran: 1) inyección de polímeros combinado con tablestacas laterales a lo largo del tramo de tratamiento, y 2) el apoyo de la estructura con pilas colocadas hasta el estrato de roca que se encuentra entre 13 y 15 m de profundidad.

Por otro lado, el incremento del nivel freático produce problemas adicionales, tales como filtraciones a través de los muros que impactan sobre las instalaciones eléctricas y los equipos mismos del tren.

Finalmente, y debido a la incertidumbre que presenta la inyección de polímeros en cuanto a la forma en que se desplazaría dentro de un suelo completamente saturado y con densidades con variaciones extremas, se decidió seleccionar la segunda alternativa como la más conveniente.

Introducción

La problemática se ubica en la junta constructiva, entre la vía subterránea (túnel) y la transición a la superficie (rampa). La fotografía 1 muestra el sitio donde emerge el agua freática.

Las filtraciones de agua al recinto formado por el túnel y la rampa que alojan las vías del tren eléctrico, ubicado en el vado de Atemajac, es una problemática que persiste prácticamente desde hace cuarenta

años. Ha ocasionado el lavado del suelo que sustenta la estructura, provocando pérdida parcial del apoyo de la losa, y que parte de las estructuras se encuentren prácticamente flotando sobre el agua freática.

Para comprender la problemática se han realizado diversos estudios. El más reciente, efectuado en 2010 por el IMTA, indica que el agua de este vado pertenece a un acuífero somero de 14 m de profundidad, independiente del acuífero regional que se encuentra a profundidades de entre 30 y 60 metros

Asimismo recomienda, a la mayor brevedad posible, llevar a cabo los trabajos necesarios para detener la migración de los sedimentos por la unión entre la rampa-túnel, para evitar que la zona inestable que



Fotografía 1. Unión túnel rampa. Surgimiento de agua freática a través de la junta de la unión.

se localiza por debajo de la losa del fondo aumente hasta alcanzar proporciones que hagan fallar las estructuras involucradas. A fin de evitar la migración de los materiales que forman el suelo de soporte, se recomienda densificar toda la zona inestable mediante la técnica de inyección de mezclas a base de cemento o polímeros de alta densidad debido a que, además de solucionar la problemática ya existente (suelos en estado de fluido viscoso, mezcla de agua con sedimentos), aumenta la capacidad de carga del subsuelo y reduce, e incluso puede eliminar las filtraciones al interior del cajón.

Debido a las características especiales involucradas en la problemática y su solución, es necesario desarrollar un proyecto ejecutivo en el que se especifique no sólo la mejor técnica de densificación, sino también la secuencia de los trabajos a realizar, considerando la operación del tren eléctrico y de la vialidad aledaña (Av. Federalismo).

Tomando como antecedente principal este estudio del IMTA de 2010, los estudios complementarios se enfocaron a conocer con más detalle las características del suelo con la finalidad de definir los parámetros de inyección.

Para lograr lo anterior, se efectuó una campaña de nueve sondeos con la técnica geotécnica de penetración estándar (SPT) hasta una profundidad mayor al estrato de roca. Esta técnica permite conocer un parámetro de resistencia del suelo y correlacionarlo con su capacidad, compacidad, tipo de suelo, etcétera.

En el sondeo SPT9 se hizo una prueba de inyección de polímeros en el sitio combinado con sondeos a cielo abierto para observar las características del suelo en estado natural y su relación con los SPT, así como el desempeño del sistema de densificación. La ilustración 1 muestra el sitio de los sondeos.



Fotografía 1. Unión túnel rampa. Surgimiento de agua freática a través de la junta de la unión.

Resultados

El análisis de la información recopilada y obtenida de los estudios complementarios se realizó mediante interpolación de los datos geotécnicos, principalmente los resultados de las pruebas SPT. Se aplicaron dos técnicas: interpolación simple y modelo bayesiano de interpolación espacial.

Interpolación simple

- Esquema de regresión convencional aplicada a la interpolación espacial.
- Programa Surfer.
- Método de Kriging.

Modelo bayesiano de interpolación espacial

- Esquema estadístico para restringir la interpolación espacial de los perfiles de resistencia, mediante el uso de la técnica de regresión bayesiana.
- Soluciones más estables y racionales que las que se obtendrían al seguir esquemas de regresión convencionales para la interpolación espacial de datos geofísicos, geológicos y geotécnicos.
- Restricciones de tipo juicio ingenieril, experiencia de la problemática, opinión de expertos, lo cual conviene aplicarse a muestras con alto contenido de incertidumbre y variabilidad espacial.

La ilustración 2 muestra la gráfica de distribución espacial de los resultados de SPT para la elevación 1502.3, inmediatamente bajo la losa en la unión rampa-túnel. Se aprecia que el material con resistencia muy baja se ubica del lado oeste al sur de la unión. Son resultados obtenidos con la técnica de interpolación simple.

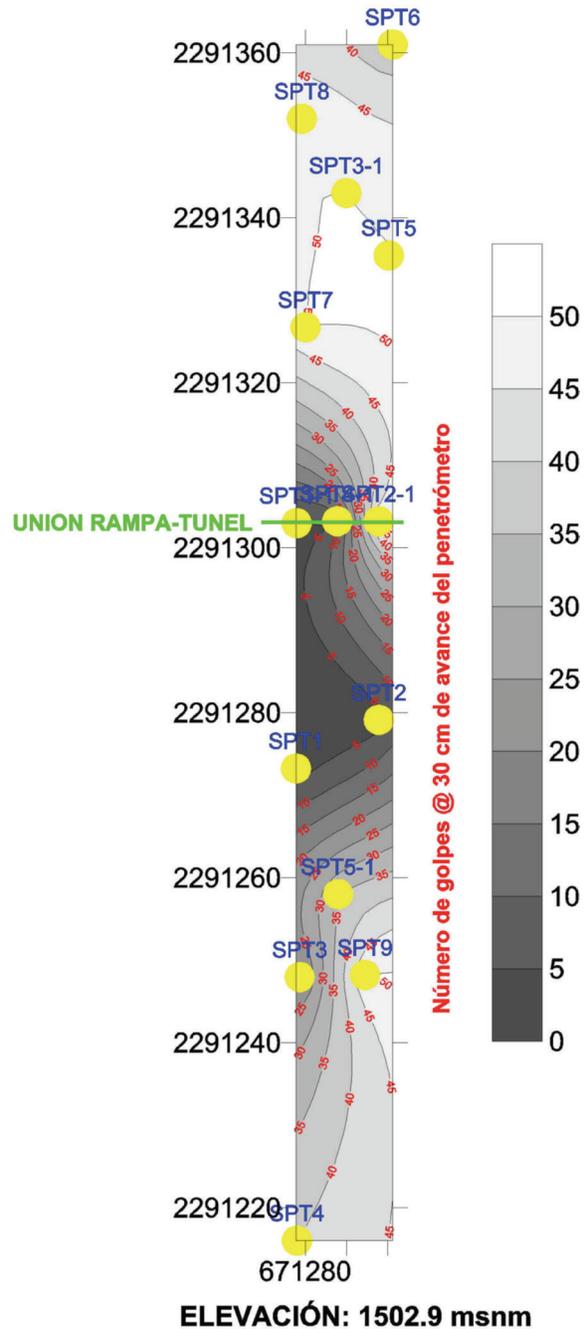


Ilustración 2. Gráfica de la distribución espacial con la técnica de interpolación simple.

La ilustración 3 muestra las gráficas de la distribución espacial de los resultados de SPT para la elevación 1502.3, inmediatamente bajo la losa en la unión rampa-túnel. Se aprecia que el material con resistencia muy baja se ubica del lado oeste al sur de la

unión. También, muestra la distribución de los coeficientes de variación. Representa el error por insuficiencia de datos; el error crece con el valor. Para este nivel se obtuvo un valor máximo del 30%, que se considera adecuado para el tipo de datos utilizados.

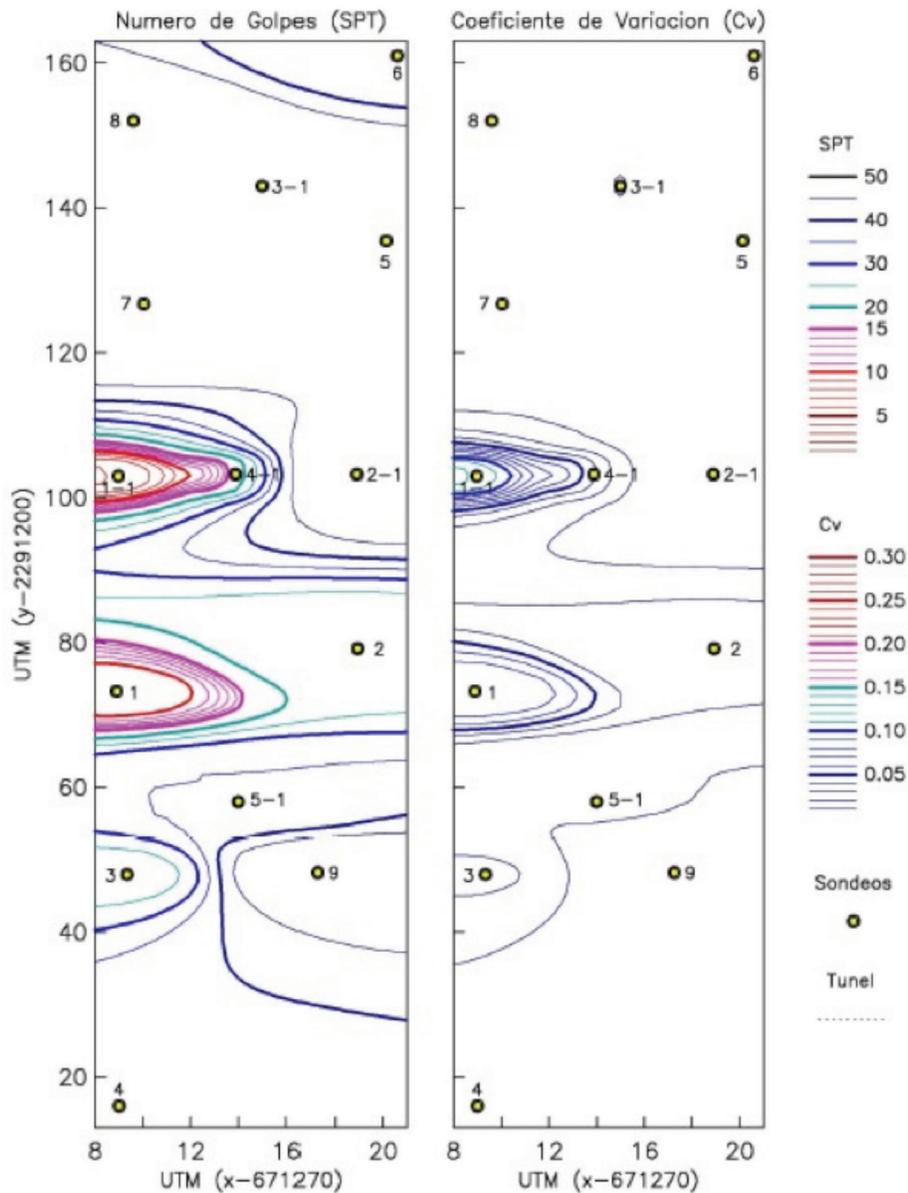


Fig 10. Número de golpes y coeficientes de variación para la Elevación 1502.9

Ilustración 3. Gráfica de la distribución espacial con la técnica de interpolación bayesiana.

Se observa que la distribución y valores de los resultados obtenidos con el modelo bayesiano es similar al obtenido con la interpolación simple; además, el comportamiento de los resultados es más congruente sin aplicar coeficientes restrictivos, lo cual indica que la muestra y calidad de los datos es adecuada.

Conclusiones y recomendaciones

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se consideró prudente realizar in-

terpolaciones simples utilizando los datos originales, con lo que se obtuvieron los perfiles de las ilustraciones 4 y 5, donde se muestra también la alternativa seleccionada descrita en el resumen.

Es importante mencionar que en la actualidad se aprovecha el flujo de agua que brota dentro del recinto formado por la rampa y el túnel, integrándolo al sistema de abastecimiento de agua potable y, que de acuerdo con los comentarios, sólo requiere el tratamiento de cloración. Esto ha per-

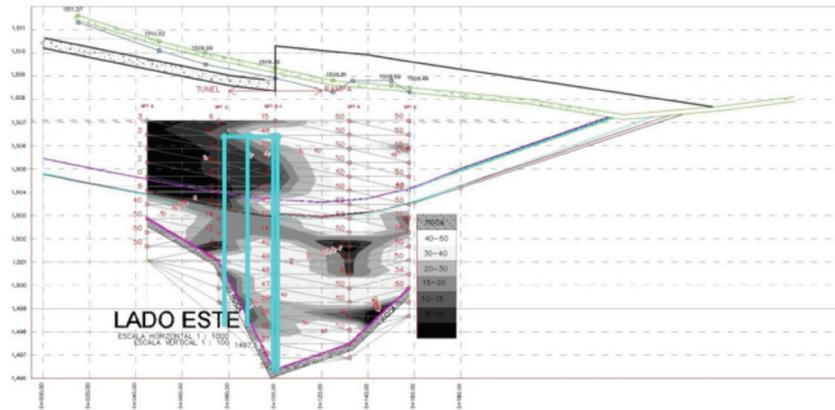


Ilustración 4. Perfil vertical de los sondeos del lado este del tramo de estudio.

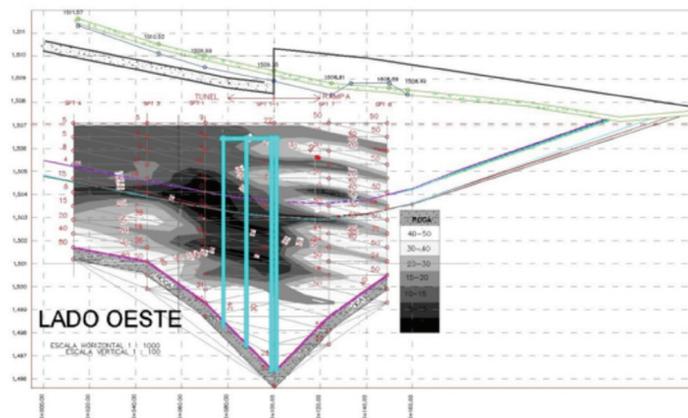


Ilustración 5. Perfil vertical de los sondeos del lado oeste del tramo de estudio

mitido mantener controlado el nivel freático alrededor de la estructura, por lo que se recomienda continuar con este proceso pero de manera más controlada, mediante la captación y conducción del flujo en tubería cerrada, de forma que se evite también la contaminación del balasto que soporta los durmientes y rieles del tren.

Bibliografía

- Bonola, I. *Diagnóstico de las condiciones actuales de las filtraciones de agua subterránea en la rampa-cajón del túnel conocido como vado de Atemajac, así como la determinación de posibles oquedades, haciendo las recomendaciones pertinentes y la valoración del riesgo potencial a la operación cotidiana del tren eléctrico.* (2009). Informe final. (Actividad 2. Estudios de Mecánica de Suelos). Convenio No. SITEUR-IMTA-CONV-001-2009.
- Diestra, S. A. de C. V. (1999). *Análisis estructural, rampa de túnel, zona Atemajac*, Informe final. 36.
- Limón, J. M. (1999). *Estudio de mecánica de suelos en la rampa Atemajac*. Informe final. 54.

Pérez-Rocha, L. E., Ordaz, M. y Reinoso, E. (2009). Interpolación espacial de las amplificaciones dinámicas del terreno en el valle de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 80, 85-112.

Resumen curricular

Gilberto Salgado Maldonado. Ingeniero civil y maestro en Ciencias con especialidad en Hidráulica General por el Instituto Politécnico Nacional (1985). Especialista en hidráulica del IMTA, en la Coordinación de Hidráulica.

Javier Avilés López. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Puebla y maestro y doctor en Ingeniería (Estructuras) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Especialista en hidráulica del IMTA, en la Coordinación de Hidráulica.

Ricardo Álvarez Bretón. Ingeniero civil por la Universidad Nacional Autónoma de México y maestro en Ingeniería de Aprovechamientos Hidráulicos por la División de Estudios de Posgrado de esta misma universidad. Especialista en hidráulica del IMTA, en la Coordinación de Hidráulica.

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL APORTE DE AGUA DEL MANTO FREÁTICO AL REQUERIMIENTO DE RIEGO DE LOS CULTIVOS

E. Castillo y H. E. Saucedo

Resumen

Se presenta un modelo numérico del aporte de agua del manto freático al requerimiento de riego de los cultivos, el cual tiene como base la solución del elemento finito de la ecuación unidimensional de Richards, aplicando una condición de frontera de radiación de Newton en la superficie del suelo, para modelar el proceso de la evapotranspiración. La aplicación del modelo desarrollado permite concluir que existen diferencias entre las láminas de agua aportadas del manto freático al requerimiento de riego de los cultivos, al utilizar evaporación constante o variable durante el día, siendo la condición de evapotranspiración constante la que produce un mayor aporte de lámina de agua a los cultivos, debido a que sobreestima la tasa de evapotranspiración durante el día.

Introducción

La cuantificación del aporte de agua proveniente de un acuífero resulta de interés en numerosos problemas agronómicos, hidrogeológicos y ambientales. Entre los más importantes se encuentran el cálculo de láminas de riego de los cultivos y el estudio de salinización de suelos en regiones semiáridas.

En ingeniería de riego, es importante conocer si el aporte de agua del acuífero es suficiente para satisfacer el requerimiento de agua de los cultivos o, en caso contrario, conocer cuánto y cuándo regar. En el área del drenaje agrícola, se pueden analizar diversas alternativas para establecer la profundidad adecuada de drenes subterráneos que permita el flujo de agua desde el manto freático hasta la zona de raíces de los cultivos. En este trabajo se utilizó el método del elemento finito para resolver la ecuación de Richards en forma de presión, en una dimensión. Para modelar la evapotranspiración, se impuso en la superficie del suelo, en una primera etapa, una condición de Neumann con flujo constante. En una segunda etapa, se usó una condición de radiación de Newton, proponiendo una resistencia al flujo de forma potencial cuadrática. Con el modelo numérico desarrollado se estudió la transferencia de agua entre el manto freático, el perfil del suelo y los cultivos, eligiéndose al cultivo del maíz por ser un cultivo representativo en las zonas del país donde existe aporte de agua del manto freático. Se determinó modelar en los primeros cuarenta días de crecimiento del cultivo, periodo en el que se estima existe humedad residual en el suelo (después del periodo de lluvias).

Resultados

El esquema numérico se codificó en el lenguaje de programación C++ y se ejecutó para simular el aporte de agua del manto freático para profundidades iniciales de 100, 150, 200, 250 y 300 cm. La tasa de evapotranspiración se propuso variable durante el día siguiendo una variación senoidal, como se muestra en la ilustración 1.

Comportamiento del nivel freático a evapotranspiración constante y variable

En la ilustración 2 se observa que, para una misma profundidad inicial, existen diferencias entre los resultados obtenidos para evapotranspiración variable o constante, siendo el último caso donde se presenta un mayor descenso del nivel freático. En los primeros cinco días el descenso es muy marcado; después, se estabiliza y se tienen los descensos promedios que se muestran en la tabla 1.

Comportamiento de los flujos calculados a la profundidad de la raíz

Se calculó el flujo a una profundidad variable igual a la profundidad de la raíz del cultivo; la profundidad de la raíz cambia conforme el cultivo se desarrolla. El flujo así calculado es el que la planta puede usar para satisfacer la evapotranspiración. En la ilustración 3(a) se presenta el comportamiento del flujo a la profundidad de la raíz, calculado para diferentes profundidades iniciales del manto freático y con evapotranspiración variable durante el día. Se observa que cuando la profundidad inicial del nivel freático se acerca al nivel del suelo, el flujo es mayor y que, cuando el nivel freático desciende en el tiempo, el flujo disminuye, así como su oscilación. Esto, debido a la resistencia al flujo representada mediante la condición de radiación de Newton. Cuando la evapotranspiración es constante, los flujos son mayores que cuando es variable [ilustración 3(b)].

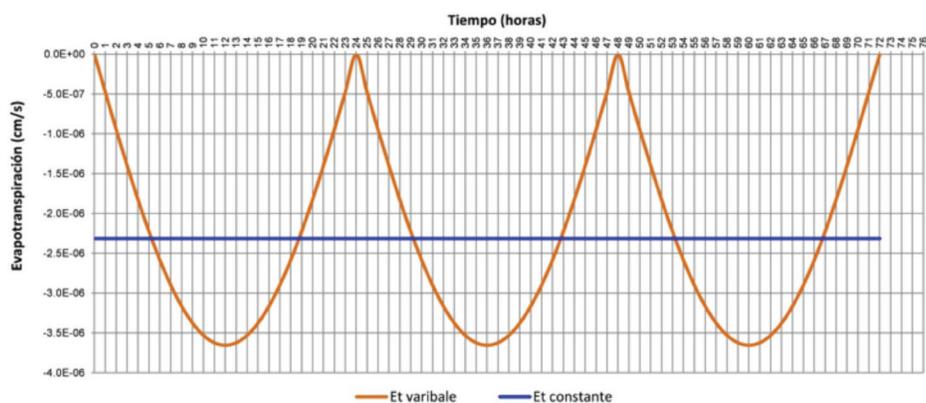


Ilustración 1. Evapotranspiración variable y constante.

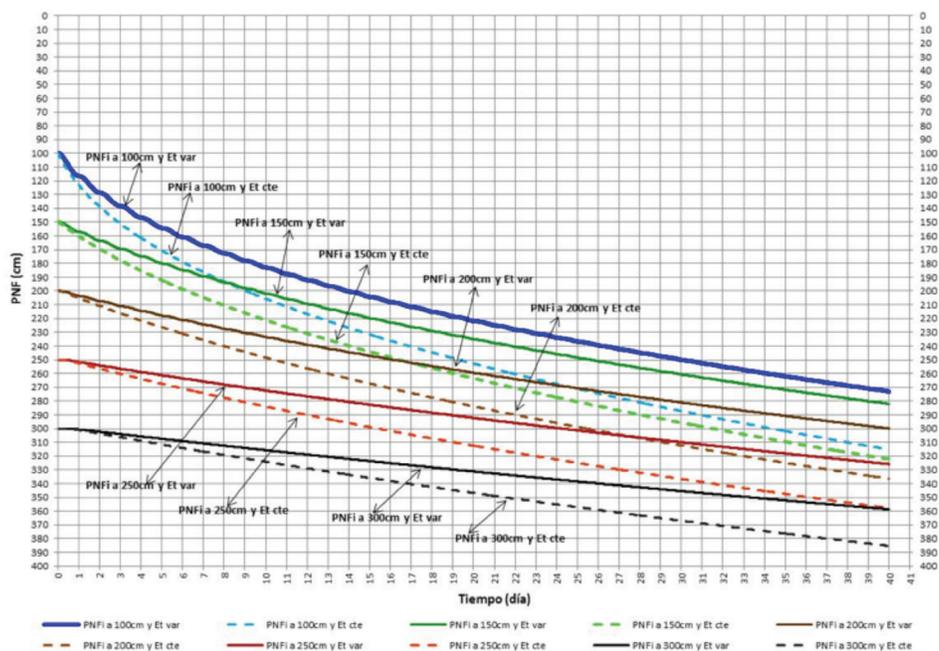


Ilustración 2. Profundidades del nivel freático con evapotranspiración variable y constante.

Tabla 1. Descensos promedio (cm/día) del nivel freático, a diferentes profundidades iniciales a evapotranspiración variable y constante.

PNFi (cm)	Et variable	Et constante
100	3.0	3.8
150	2.8	3.5
200	2.3	3.0
250	1.8	2.5
300	1.5	2.2

Láminas de agua aportadas

Al sumar, en los cuarenta días de la modelación los flujos calculados a la profundidad de la raíz, se obtuvieron las láminas de agua que el manto freático aporta al cultivo. En la tabla 2 se muestra que la

lámina aportada es mayor para evapotranspiración constante que para evapotranspiración variable. Las láminas son mayores (para ambas condiciones de evapotranspiración) a profundidades iniciales del nivel freático cercanas a la superficie del suelo.

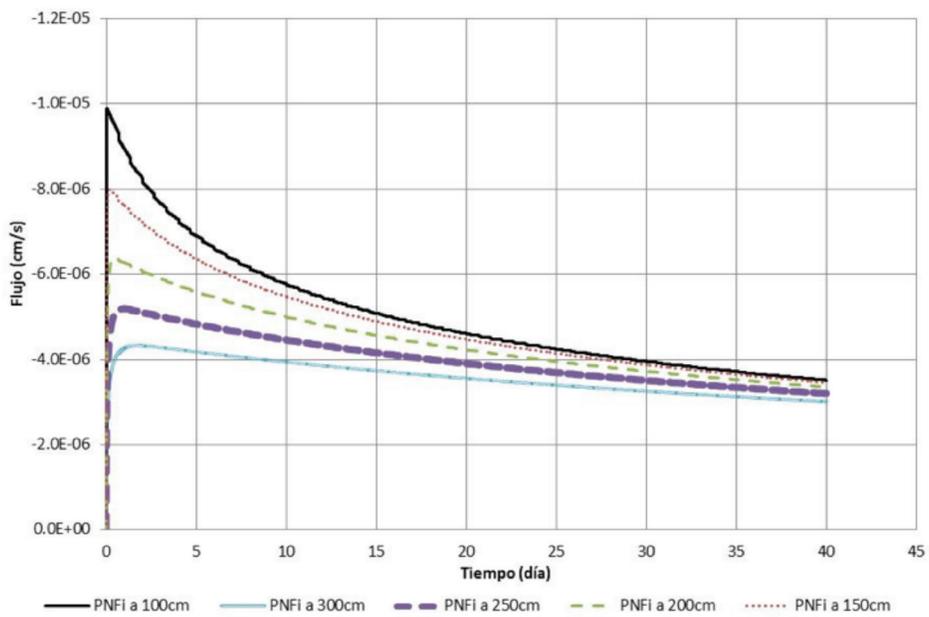
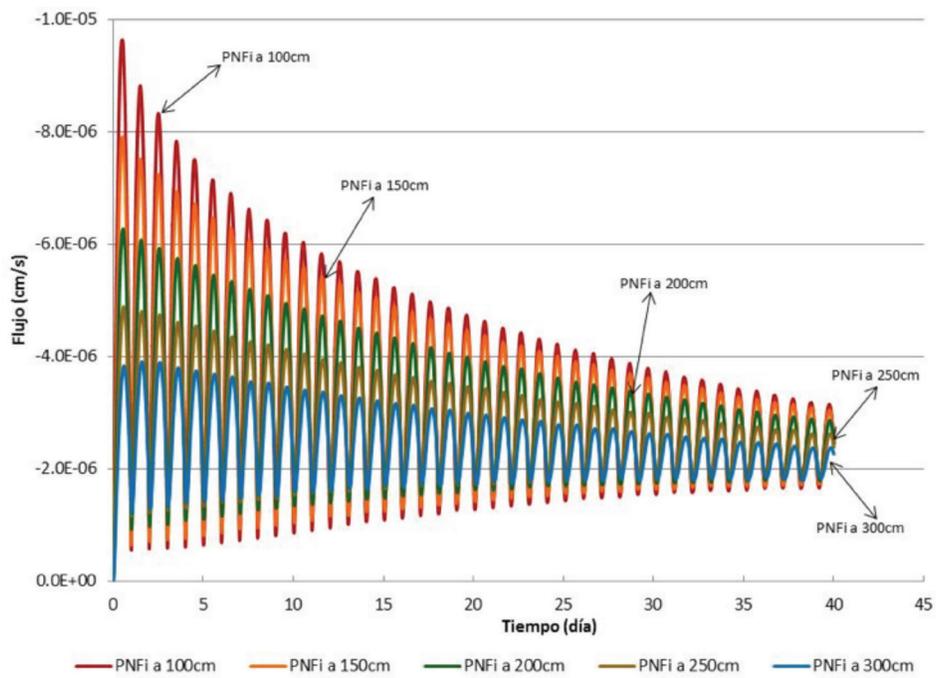


Ilustración 3. Flujos calculados a la profundidad de la raíz, a diferentes profundidades iniciales del nivel freático y con evapotranspiración variable (a) y constante (b).

Tabla 2. Láminas aportadas a Et constante y variable (cm).

PNFi (cm)	Et constante	Et variable
100	17.52	12.20
150	16.60	11.40
200	15.30	10.40
250	13.80	9.39
300	12.40	8.39

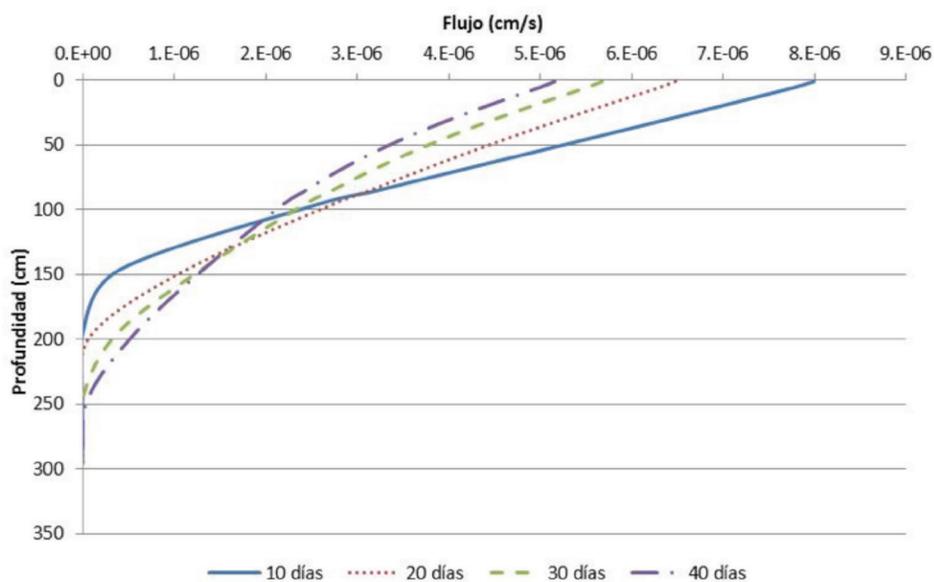
Perfiles de flujo en diferentes días

Se calcularon los flujos a diferentes profundidades (entre 1 y 300 cm) para diez, veinte, treinta y cuarenta días, con diferentes profundidades iniciales y se graficaron los resultados para evapotranspiración variable y constante. Los mayores flujos se presentan en profundidades del nivel freático cercanas al nivel del suelo para evapotranspiración variable y constante.

Con respecto al tiempo, en los primeros días de la simulación se presentan los mayores flujos de agua. Los flujos son más importantes cuando la evapotranspiración es constante que cuando es variable.

Conclusiones

En este trabajo se modeló numéricamente el aporte de agua del manto freático al requerimiento de riego de los cultivos, medi-



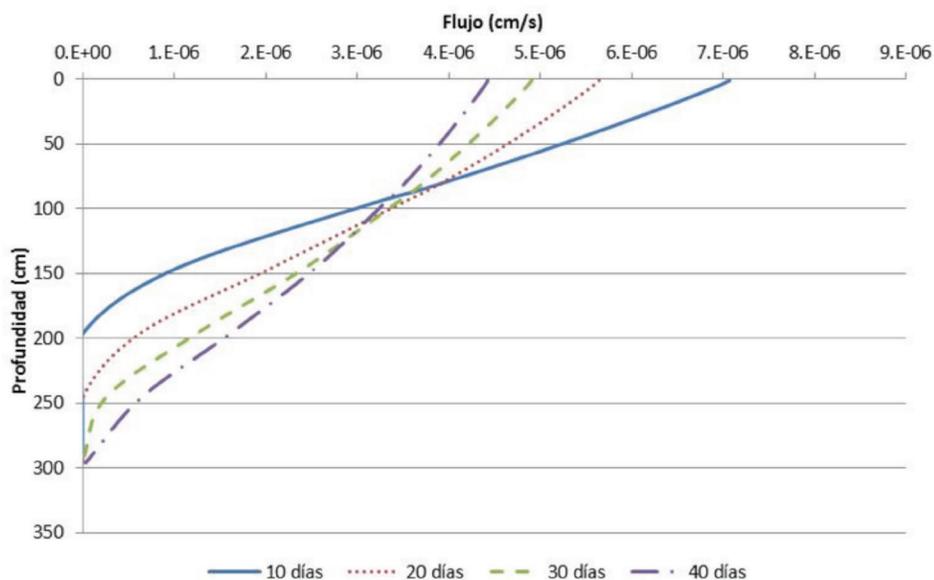


Ilustración 4. Perfiles de flujo, con una profundidad inicial del nivel freático de 100 cm a evapotranspiración variable (a) y constante (b).

ante la solución de la ecuación de Richards en una dimensión, utilizando el método del elemento finito. De los resultados obtenidos, se puede concluir que: a) es posible estimar hasta qué fecha el agua aportada por el manto freático es suficiente para satisfacer el requerimiento de riego de los cultivos y, por consiguiente, conocer cuándo se debe aplicar un primer riego, y b) existen diferencias entre las láminas de agua aportadas del manto freático al requerimiento de riego de los cultivos, al utilizar la evaporación en forma constante y variable durante el día. La condición de evapotranspiración constante induce un mayor aporte al requerimiento de riego de los cultivos, debido a que no describe correctamente la tasa evapotranspirativa en el transcurso del día, como lo hace la evapotranspiración en forma variable.

Bibliografía

- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Dover Publications.
- FAO (1990). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*.
- Fuentes, C., Haverkamp, R. & Parlange, J. Y. (1991). Sobre las formas de las características hidrodinámicas de los suelos no saturados. *Agrociencia*. Estado de México: Colegio de Postgraduados.
- León, T. (2004). *Modelación bidimensional del drenaje agrícola con la ecuación de Boussinesq*. Universidad Nacional Autónoma de México: tesis de maestría.

- Mori, M. (1983). *The Finite Element Method and its Applications*. New York: Ed. Macmillan.
- Neumann, S. (1973). Saturated-Unsaturated Seepage by Finite Elements. *Journal of the Hydraulic Division*. ASCE (HY12), 2233-2249.
- Richards, L. (1931). Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. *Physics*, 1, 3018-3333.
- Saucedo, R. (1997). *Flujo de agua hacia drenes subterráneos*. Universidad Nacional Autónoma de México: tesis de maestría.
- Zavala, M. (1998). *Simulación numérica de flujo de agua bajo condiciones de riego por goteo*. Universidad Nacional Autónoma de México: tesis de maestría.

Resumen curricular

Erickdel Castillo Solís. Ingeniero en Irrigación por la Universidad Autónoma Chapingo. Maestro en Ingeniería con especialidad en Hidráulica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Especialista en Hidráulica adscrito a la Subcoordinación de Contaminación y Drenaje Agrícola del Instituto Mexicano de Tecnología de Agua.

Heber Eleazar Saucedo Rojas. Ingeniero Agrónomo Especialista en Irrigación por la Universidad Autónoma Chapingo. Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola de la Coordinación de Riego y Drenaje del Instituto Mexicano de Tecnología de Agua.

DESARROLLO DE METODOLOGÍAS Y SU APLICACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE CIANOBACTERIAS Y COMPUESTOS EMERGENTES EN CUERPOS DE AGUA Y AGUA POTABLE

M. Sánchez, M. Avilés, A.M. Sandoval y N. Ramírez

Resumen

En este artículo se presenta la implementación de un método analítico para la determinación de ocho compuestos emergentes (compuestos farmacéuticos) en agua. La lista de compuestos incluye analgésicos, antipiréticos, antirreumáticos y agentes que disminuyen los lípidos. El método se basa en la extracción en fase sólida, la derivación de los compuestos ácidos y la determinación por cromatografía de gases-espectrometría de masas. Asimismo, se realizó la validación del método, la cual incluye la determinación de la linealidad, exactitud (porcentaje de recuperación), precisión (coeficiente de variación), límites de detección y de cuantificación. Además, se efectuó el muestreo y diagnóstico en la presa de Valle de Bravo, Estado de México, de microcistina LR (compuesto emergente natural), mediante extracción en fase sólida y cromatografía de líquidos con arreglo de diodos. Este compuesto proviene de las floraciones de cianobacterias, que se están convirtiendo en un problema primordial en la calidad del agua en muchos países del mundo debido a la producción de cianotoxinas, con actividad hepatotóxica y neu-

rotóxica, que las convierten en un riesgo para la salud pública. El diagnóstico de calidad del agua abarcó de septiembre a diciembre, con un total de seis muestreos en agua superficial y de arrastre con red. La presencia de microcistina LR se detectó en las muestras de agua superficial, en concentraciones promedio desde 0.29 hasta 1.2 $\mu\text{g-L}^{-1}$. En lo que respecta a la cuantificación de microcistina LR en muestras de agua colectadas a 50 cm de profundidad, éstas presentaron valores promedio de 0.11 hasta 1.2 $\mu\text{g-L}^{-1}$, superando el valor establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de 1 $\mu\text{g L}^{-1}$.

Introducción

La actividad que diariamente desarrollamos como sociedad implica la generación de alteraciones sobre nuestro medioambiente. Así, actividades tan comunes como la higiene personal o el cuidado de la salud pueden provocar serios problemas en el ecosistema, dado que incorporamos a éste una serie de sustancias de diferente origen y naturaleza química, de las cuales se sabe relativamente poco respecto de su impacto en los distintos compartimentos

ambientales y en el ser humano; sustancias que los investigadores han dado en denominar “contaminantes emergentes”.

Dentro de estos contaminantes están los productos farmacéuticos (antibióticos, antidepresivos, hormonas, etcétera) y sus subproductos (metabolitos), un tema interesante de estudiar considerando que, en el ámbito mundial, las investigaciones en este campo se vienen desarrollando hace ya veinte años; y si bien no se trata de compuestos persistentes, su constante utilización y vertimiento los hacen estar presentes en nuestro entorno. La principal fuente de ingreso al ecosistema de este tipo de compuestos son las descargas de aguas servidas no tratadas y los efluentes de las plantas de tratamiento de esta agua. En lo que respecta a la presencia de productos y subproductos farmacéuticos en agua para consumo humano, existe ciertamente un riesgo para la población que debe ser estudiado. Actualmente las plantas de tratamiento, ya sean las de agua para consumo humano como las aguas servidas, no están diseñadas para tratar y eliminar productos y subproductos farmacéuticos, por lo que conocer su presencia en nuestro medio es fundamental. Otros contaminantes emergentes naturales son los producidos en las floraciones de cianobacterias.

Las floraciones de cianobacterias se están convirtiendo en un problema primordial en la calidad del agua en muchos países del mundo, debido a la producción de cianotoxinas, con actividad hepatotóxica y neurotóxica, que las convierten en un riesgo para la salud pública. Entre las cianotoxinas, las microcistinas son las toxinas más frecuentemente detectadas en aguas superficiales.

De acuerdo con Falconer (1999), las toxinas producidas por cianobacterias se dividen en neurotoxinas, dermatotoxinas y hepatotoxinas, conforme sus efectos tóxicos en mamíferos. Las especies ya identificadas como productoras de hepatotoxinas están incluidas en los géneros *Microcystis*, *Anabaena*, *Nodularia*, *Oscillatoria*, *Nostoc* y *Cylindrospermopsis* (Carmichael, 1994). La especie *Microcystis aeruginosa* está considerada como una de más amplia distribución en territorio nacional, y la *Anabaena*, el género con mayor número de especies potencialmente tóxicas, conforme a Carmichael (1994). El tipo más común de intoxicación involucrando cianobacterias se ocasiona por hepatotoxinas (Chrorus, et al., 1999), destacándose las microcistinas (LR, YR y RR), las cuales pueden causar severos daños al hígado (Nishiaki et al., 1992). En 1997, la OMS estableció como valor provisional de referencia: 1 ug L-1, como nivel máximo aceptable para el consumo oral diario de microcistina-LR, en aguas de abastecimiento público.

En nuestro país, un embalse afectado por la eutroficación es la presa de Valle de Bravo, Estado de México, en la que en el periodo de 1992 a 1993 se detectaron altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, pH básico con valores de hasta 9.4 y temperatura del agua entre 20-25 °C, condiciones que hacen posible la presencia de florecimientos cianobacterianos.

Resultados

Se implementó y desarrolló un método para la determinación de ocho fármacos en agua, mediante extracción en fase sólida y posterior cuantificación por cromatografía de gases espectrometría de masas. Los fármacos incluidos en el método desa-

rollado y los resultados de la validación se presentan en la tabla 1.

Los ocho fármacos presentan una alta linealidad con coeficientes de correlación mayores a 0.99 y pendientes de 0.9912 a 1.0084, cumpliendo con los criterios de aceptación establecidos en el procedimiento de validación. Los porcentajes de recuperación están en el rango de 97.68 a 105.72%, con coeficientes de variación de 1.57 a 6.34, cumpliendo con el criterio de ser menores al 20%. El cromatograma obtenido para los ocho compuestos en el método desarrollado, se presenta en la ilustración 1.

En lo que respecta al diagnóstico de la calidad del agua y del contenido de microcistina en la presa de Valle de Bravo, se tuvieron los siguientes resultados: pH de 8.2 a 8.7 y temperaturas de entre 20 y 22 °C, en el tiempo de evaluación de septiembre a diciembre de 2013.

Los nutrientes, como nitratos, presentaron concentraciones en el intervalo de 0.12- 0.41 mgL-1, nitritos con concentraciones menores o iguales a 0.019 mgL-1; mientras que los fosfatos se mantuvieron a 0.9

mgL-1, a excepción de noviembre en que se presentaron valores de 0.36 mgL-1 y un incremento en la concentración en tres puntos de muestreo en el mes de diciembre: 2.72, 10.74 y 14.87 mgL-1.

Para el parámetro de Clorofila “a”, la mayor concentración se registró en la estación Avándaro 1 en el mes de octubre, con un valor de 26 mg m⁻³, por lo que se considera eutrófico, ya que se encuentra en el intervalo de 8 a 25 mg m⁻³. El valor promedio de clorofila para los diferentes muestreos se registró en el intervalo de 2 a 7.9 mg m⁻³, considerándose mesotrófico.

En el muestreo de diciembre los valores de clorofila se incrementaron, considerándose este embalse con base en el resultado como un cuerpo de agua hipertrófico. Se cuantificaron concentraciones superiores de 216, 278 y 296 mg m⁻³ en San Gaspar, Obra de Toma 2 y Santuario, respectivamente. El comportamiento de clorofila-a se muestra en la ilustración 2.

En la tabla 2 se presentan los valores promedio de nutrientes en la presa de Valle de Bravo en el periodo 1999-2013.

Tabla 1. Compuestos emergentes y parámetros de validación.

Resultado del desarrollo de la metodología para un grupo de Farmacos Acidos							
Compuesto	LDM	LCM	Exactitud	CV	m=	b=	r=
Acido Clofibrico	0.0006	0.0122	100.73	1.57	1.0084	-0.0003	0.9997
Diclofenaco	0.0027	0.0211	103.54	5.29	1.0008	0.0001	0.9996
Fenofibrato	0.0012	0.0141	105.72	2.8	1.0009	0.0002	0.9982
Fenoprofeno	0.002	0.0182	104.53	4.09	1.0013	-0.0003	0.9994
Gemfibrozil	0.0014	0.0136	99.11	3.66	0.9968	-0.0005	0.9989
Ibuprofeno	0.0025	0.0169	97.13	6.59	1.0002	0.0002	0.9987
Indometacina	0.001	0.0125	97.68	2.65	0.9912	0.0002	0.9990
Naproxeno	0.0024	0.0165	99.57	6.34	1.0007	-0.0006	0.9993

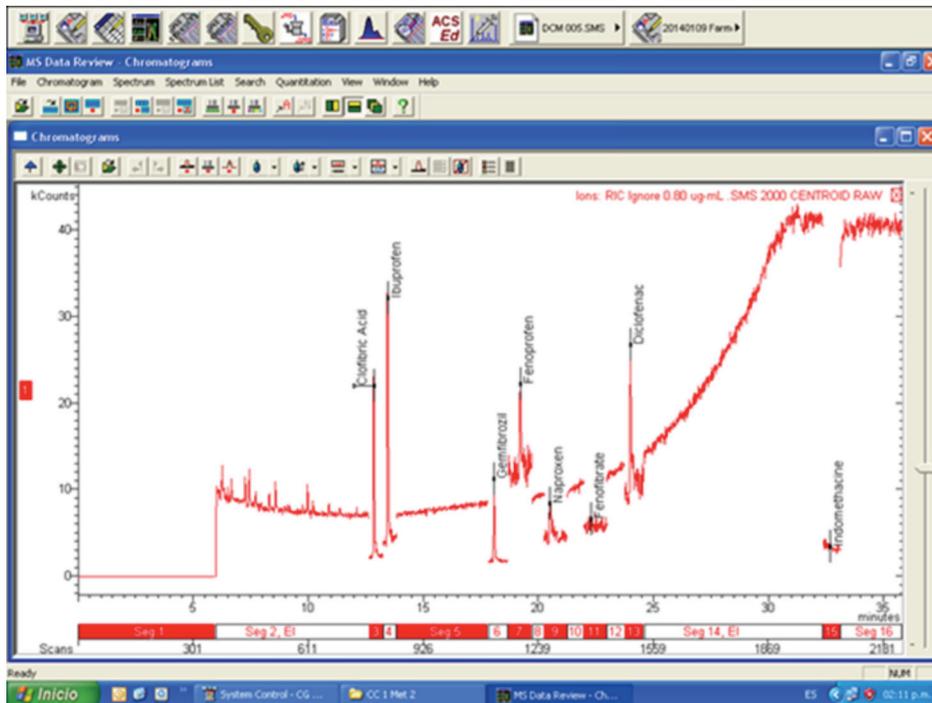


Ilustración 1. Cromatograma de ocho fármacos en agua.

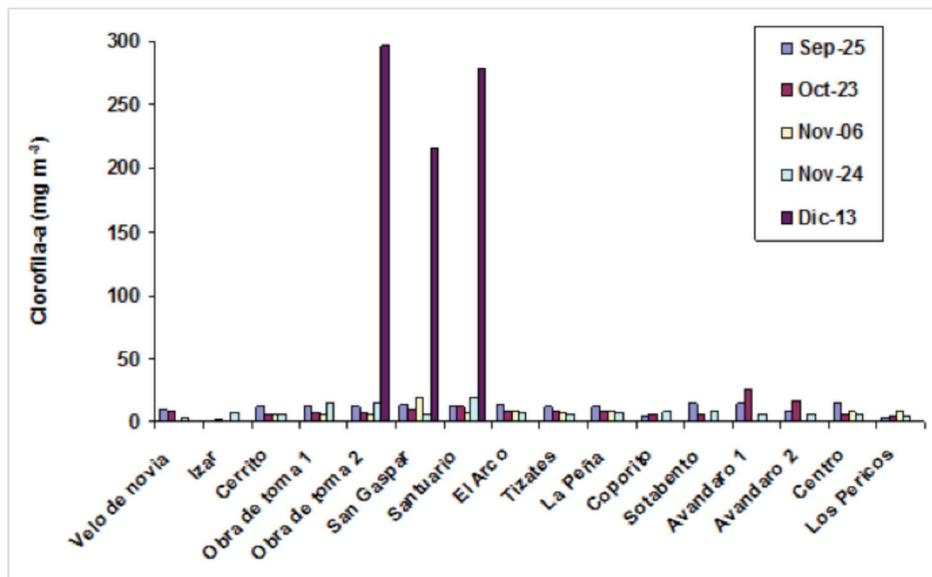


Ilustración 2. Clorofila-a en la presa de Valle de Bravo.

Tabla 2. Valores promedio de nutrientes Presa Valle de Bravo (1999-2013).

Parámetro	Criterios ecológicos fuentes abastecimiento	Valor promedio (CNA/IDE-CA, 1999)	Valor promedio (CNA/IDE-CA, 2000)	Valor promedio (CNA/IMTA 2001) nivel superficial	Valor promedio (CNA/ACU-AGRANJAS, 2002)	Valor promedio IMTA, 2013
pH	5 - 9	6.8	7.1	8.7	7.12	8.45
NTK (mg L ⁻¹)	-	0.74	0.68	No detectado	0.57	1.38
Nitritos (mg L ⁻¹)	0.05	0.006	0.003	0.028	0.02	0.019
Nitratos (mg L ⁻¹)	5	0.106	0.116	0.232	0.106	0.19
Fosfatos totales (mgL ⁻¹)	0.1	0.145	0.066	No detectado	0.182	0.88

Para el caso de la microcistina, durante los seis muestreos realizados de septiembre a diciembre se detecta la presencia de microcistina LR. En el primer muestreo se identifica la microcistina en la mayoría de los sitios monitoreados, a excepción de Avándaro. Los valores promedio fueron 0.29 a 0.52 $\mu\text{g L}^{-1}$; para el segundo muestreo efectuado en septiembre, se identificó la microcistina en los sitios de Cerrito, Obra de Toma, San Gaspar y Santuario, en concentraciones de 0.37 a 0.46 $\mu\text{g L}^{-1}$. En la ilustración 3 se presentan las concentraciones detectadas en los seis muestreos.

Se observa que las floraciones de cianobacterias se incrementan en los meses de noviembre y diciembre, y que los valores detectados en el sexto muestreo rebasan el valor de 1 $\mu\text{g L}^{-1}$, establecido por la OMS

como nivel máximo aceptable en aguas de abastecimiento público.

Con relación a las muestras colectadas en la red de plancton de 70 μm a 50 cm de profundidad, en el primer monitoreo se detectó la presencia de microcistina LR. En la ilustración 4, se presenta la gráfica del comportamiento de la microcistina LR en el periodo de muestreo.

En el sexto muestreo se identificó aumento en florecimientos de algas en los distintos sitios de la presa, lo cual se corrobora con los valores de microcistina LR de 0.8 a 1.2 $\mu\text{g-L}^{-1}$, correspondientes a los sitios: Velo de Novia, Izar, Cerrito, Obra de Toma, San Gaspar y Santuario. Los valores detectados en el último muestreo superan el valor establecido por la OMS de 1 μgL^{-1} .

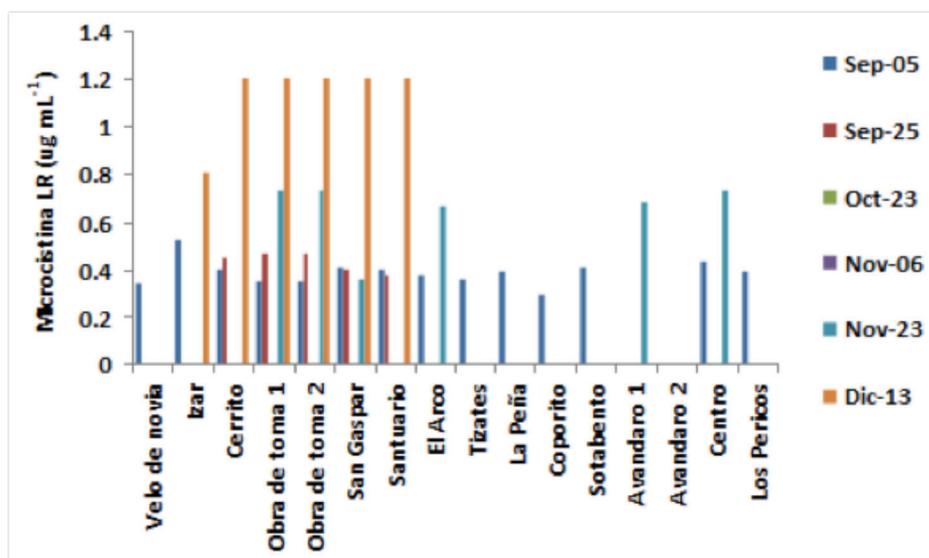


Ilustración 3. Valores de microcistina LR en agua superficial.

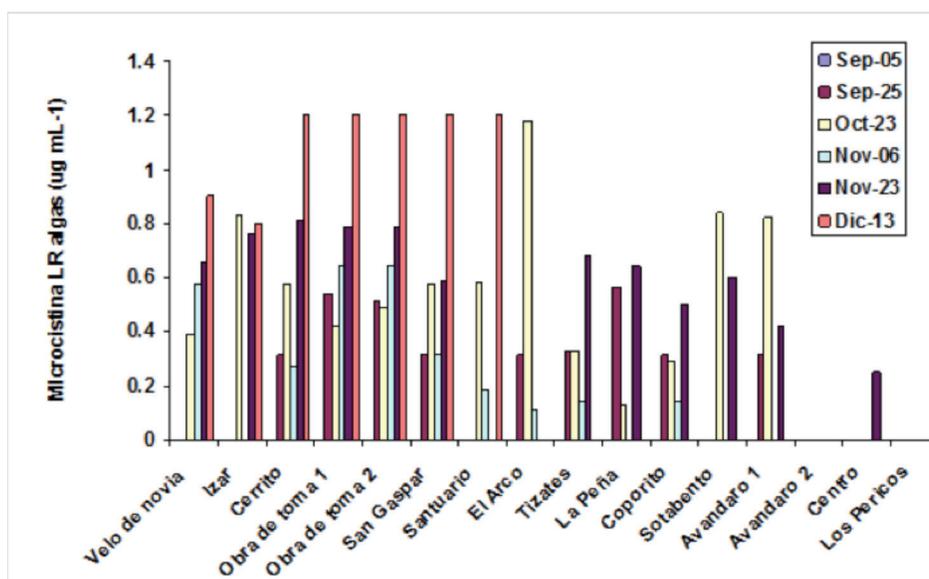


Ilustración 4. Análisis de microcistina LR a 50 cm de profundidad.

Conclusiones y recomendaciones

Se efectuó la implementación y validación de la metodología de un grupo de fárma-

cos (ocho) por cromatografía de gases-espectrometría de masas. El método es altamente lineal para cada uno de los compuestos emergentes. Tiene gran exactitud

con recuperaciones por encima del 98%; coeficientes de variación menores al 7%, con límites de detección desde 0.6 ng L⁻¹ para el ácido clofibrico hasta 2.7 ng L⁻¹ para el diclofenaco, y límites de cuantificación desde 12.2 ng L⁻¹ ácido clofibrico a 21.1 ngL⁻¹ de diclofenaco en agua.

Se realizó el diagnóstico de calidad del agua de la presa de Valle de Bravo, cuantificándose la presencia de microcistina LR en agua superficial y agua colectada a 50 cm de profundidad en concentraciones de 0.29 hasta 0.87 µg L⁻¹, con excepción del monitoreo del mes de diciembre, donde los valores de microcistina LR de los sitios Obra de Toma, San Gaspar y Santuario las condiciones fisicoquímicas y nutrientes favorecieron el florecimiento de la cianotoxina, incrementando drásticamente la concentración a 1.2 µg L⁻¹, valor que rebasa el establecido por la OMS 1 µg L⁻¹.

El valor promedio de clorofila para los diferentes muestreos se registró en el intervalo de 2 a 7.9 mg m⁻³.

Se recomienda continuar con los muestreos de calidad del agua al menos una vez al mes durante un año, abarcando época de lluvias y de estiaje, para poder evaluar la época de mayor florecimiento y cuantificar la microcistina LR, los nutrientes y la clorofila.

Bibliografía

Barceló, D., & Petrovic, M. (2006). Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste. Occurrence, Analysis and Effects. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 5(S1).

Carmichael, W. W. (1994). *Cyanobacterial Toxins: Microcystin LR in Drinking Water*.

Chorus, I. & Bartram, J. (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water. A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. Behalf of Worlds Health Organization.

CNA/Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2001a). Monitoreo de la calidad del agua en las cuencas de Valle de Bravo y Villa Victoria, Estado de México. México: Clave RD-0102.

Falconer, I. R. (1999). Cyanobacterial Toxins. *Environmental Toxicology*. 14(1) 3-4.

Martínez, R. E., Martínez, S. M. D., Millán, C. M. y Ramírez, G. P. (2002). Determinación de toxinas biológicas en una fuente de abastecimiento de agua dulce. XVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, 27-31 de octubre.

OECD (1982). *Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control*. Paris: 154.

Sacher, F., Lange, F. T., Brauch, H. J., & Blankenhorn, I. (2001). Pharmaceuticals in Groundwater. Analytical Methods and Results of a Monitoring Program in Baden-Württemberg, Germany. *Journal of Chromatography A*, 938:199-210.

Contreras, F., Castañeda, O., García, A. (1994). *La clorofila-a como base para un índice trófico en lagunas costeras mexicanas*. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

Resumen curricular

Manuel Sánchez Zarza. Químico e ingeniero ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: calidad del agua y control de con-

taminación; análisis de agua, y desarrollo e implementación de metodologías para compuestos emergentes en agua potable, superficial, residual y lodos de proceso mediante cromatografía de gases-masas y extracción en fase sólida.

Martha Avilés Flores. Ingeniera química por la Universidad Autónoma de Morelos y maestra en química por la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Líneas de investigación: desarrollo, implementación y validación de metodologías por cromatografía de líquidos de alta resolución para cianotoxinas y compuestos emergentes.

Ana María Sandoval Villasana. Química farmacéutica bióloga y maestra en Micro-

biología por la Universidad Nacional Autónoma de México, y doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional Autónoma del Estado de Hidalgo. Líneas de investigación: toxicología, toxicogenómica, ecotoxicología acuática y microbiología ambiental.

Norma Ramírez Salinas. Ingeniera industrial en química por el Instituto Tecnológico de Zacatepec y maestra en Calidad por la Universidad La Salle. Líneas de investigación: desarrollo de sistemas de gestión de calidad, programas de control de calidad y comportamiento humano en la implementación de los mismos, y cambio climático y calidad del agua

ANALIZAR LA VULNERABILIDAD Y EVALUAR LOS COSTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN OOAPAS

H. D. Camacho y A. E. García

Resumen

Este trabajo presenta una propuesta metodológica para el cálculo de costos de adaptación al cambio climático para la ciudad de Mexicali, Baja California. De manera general, la metodología consta de dos partes; análisis de vulnerabilidad y cálculo de costos. La primera permite evaluar, a través de la construcción de un índice, la sensibilidad del sistema de agua ante impactos potenciales del cambio climático y su capacidad de adaptación, basada en tres factores: grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. La segunda, utiliza información obtenida en el análisis de vulnerabilidad para determinar las posibles y diferentes opciones para adaptarse a impactos significativos, así como el costo que implica aumentar la capacidad de respuesta del organismo operador.

Introducción

El estudio de los fenómenos climáticos y sus alteraciones han sido de interés para la sociedad debido al impacto que tienen en los sectores sociales, económicos y ambientales, los cuales, bajo un enfoque de

gestión integrada de cuencas, se encuentran fuertemente vinculados. Dentro del territorio de la cuenca se desarrolla una parte del ciclo hidrológico que depende de la actividad humana. Este proceso, ya sea que se mantenga o presente alteraciones que se reflejen en la dinámica socioeconómica-ambiental y el cambio climático, es una variable insertada en la planeación de una cuenca y sus recursos hídricos, analizando, mediante escenarios, los efectos que este fenómeno tendrá en la disponibilidad de agua. Por ello, resulta necesario evaluar sus efectos y la sensibilidad de los elementos expuestos a escala local, a fin de contar con herramientas que formulen medidas de adaptación en previsión a que el cambio climático desafiará las prácticas de administración del agua, especialmente en situaciones donde se cuente con menos experiencia en la incorporación de medidas de planificación y menos recursos financieros e institucionales.

La metodología desarrollada se aplicó específicamente al caso de la ciudad de Mexicali, Baja California, considerando que en esta ciudad se proyectan incrementos en la temperatura para los próximos veinte

años, lo que podría aumentar la vulnerabilidad en la prestación de los servicios del organismo operador.

En este contexto, se desarrolló una propuesta para evaluar los costos de adaptación al cambio climático en el sector de agua potable, alcantarillado y saneamiento, mediante un análisis de las variables relacionadas con la variación de clima, ubicación geográfica, operación y desempeño del organismo operador. Para ello, se generó un índice de vulnerabilidad que establece la susceptibilidad de un sistema a la exposición de algún fenómeno; una función de demanda.

Resultados

El esquema metodológico en el que se basa la evaluación de costos de adaptación se muestra en la siguiente ilustración:

La metodología consta de tres elementos fundamentales: a) índice de vulnerabilidad; b) función de demanda que incorpora como variables independientes la tarifa, ingreso, temperatura y precipitación, y c) cálculo de costos asociados a los dos primeros elementos.

La tabla 1 muestra las variables e indicadores asociados a cada factor de vulnerabilidad.

Figura 1. Metodología de cálculo del índice de vulnerabilidad y costos de adaptación



Ilustración 1. Metodología de cálculo del índice de vulnerabilidad y costos de adaptación.

Tabla 1. Selección de indicadores de vulnerabilidad.

Factores de vulnerabilidad	Variables	Indicador	Descripción del indicador	Fuente de información
Grado de exposición	Temperatura	Temperatura promedio anual (°C)	El descenso de precipitación e incremento de temperatura causará dificultades para satisfacer las demandas crecientes de agua.	(Montero Martínez, 2010)
	Precipitación	Precipitación promedio anual (mm)		
Sensibilidad	Población/Ingreso/Precio (Demanda)	Consumo (l/h/d)	Considerando los cambios de precipitación y temperatura, el consumo implica un incremento de la demanda de agua que se traduce en mayores costos de operación.	(IMTA, 2009)
	Confiabilidad de infraestructura	Grado de confiabilidad: Gastos de mto./Ingreso total	Representa los gastos de mantenimiento en relación al ingreso total del organismo operador.	(IMTA, 2009)
	Relación Demanda-Oferta	Demanda/Oferta	Representa una relación entre el consumo y la capacidad de la infraestructura para abastecer la demanda.	(IMTA, 2009)
	Presión hídrica	Grado de presión (%): Vol. Concesionado/Agua renovable	Se refiere a la relación del consumo de agua de todos los usos localizados en la misma fuente de abastecimiento, respecto de la disponibilidad superficial y subterránea.	(CONAGUA, 2011)
	Eficiencia económica	Tarifa/Costos de producción	Debido que las tarifas de agua no reflejan el costo de producción, esta relación representa el nivel de subsidio en las tarifas domésticas.	(IMTA, 2009)

Capacidad de adaptación	Desempeño	Eficiencia física (%)	Es la relación del volumen de agua facturado, entre el de agua producido. Es indicativo de la pérdida de agua en la red.	(IMTA, 2009)
		Eficiencia comercial (%)	Representa el importe recaudado por tarifas, entre el importe de agua facturado. Es indicativo de su capacidad administrativa y financiera.	(IMTA, 2009)

La estimación de la demanda se basó en un análisis de regresión lineal, considerando: crecimiento demográfico, ingreso per cápita, tarifa media por metro cúbico, precipitación y temperatura promedio.

Una vez evaluado el nivel de vulnerabilidad, la evaluación de costos tiene la finalidad de expresar el efecto de la adaptación en términos monetarios. Bajo ese contexto, el costo de disminuir el nivel de vulnerabilidad de un organismo operador está dado por el impacto estimado del cambio climático en ausencia de adaptación, menos el impacto estimado con adaptación, ambos evaluados a través del índice de vulnerabilidad y los escenarios anteriormente descritos. Dicha adaptación, dada por un incremento en los niveles de desempeño de un organismo operador, representa los costos de inversión que implican mejorar la infraestructura, más la diferencia entre los egresos bajo un escenario de cambio climático con y sin adaptación.

Caso estudio: organismo operador de Mexicali

Se evaluó el grado de susceptibilidad de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), medido a través de diversas variables que integran el índice de vulnerabilidad: la función de demanda de cambio climático mediante el cual se relaciona la información de los conceptos presentados en la tabla anterior. Se obtuvo un índice de vulnerabilidad de 125.98, donde el grado de exposición representa un 26%, siendo la disminución en la precipitación el indicador de mayor peso. En relación al grado de sensibilidad, el indicador de grado de presión (volumen concesionado/ agua renovable) indica bajos niveles de disponibilidad, dado el crecimiento demográfico y usos del agua, representando un 15% de la vulnerabilidad total. El indicador de eficiencia económica (tarifa/costos de producción) representa un 24% del índice de vulnerabilidad total, indicando una re-

lación donde la tarifa promedio por metro cúbico es menor a los costos de producción.

En cuanto a la capacidad de adaptación, la eficiencia económica y comercial, reflejan una baja vulnerabilidad por parte de estos indicadores, representado un 5% del total del índice de vulnerabilidad.

Se propuso un conjunto de escenarios para evaluar el efecto de implementar mejoras físicas y administrativas que disminuyan su vulnerabilidad. El escenario de referencia se define en este contexto por la situación que supone crecimiento sin cambio climático, y a partir del cual se medirán la eficacia de las respuestas de adaptación y el costo que implica mejorar el desempeño del organismo operador. La siguiente figura muestra los escenarios propuestos:

Para la proyección de la demanda se emplearon datos sobre: volumen facturado, tarifa, producto interno bruto y población para el periodo 2002-2011, de acuerdo con las publicaciones del Programa de Indicadores de Gestión en Organismos Operadores (PIGOO), del IMTA. La variable climatológica corresponde a la temperatura promedio anual para el periodo 2002-2011, de acuerdo con Servicio Meteorológico Nacional.

Escenario 1. Corresponde a un escenario sin cambio climático, en el que no se presentan incrementos de temperatura y disminución de la precipitación. La población, el Producto Interno Bruto (PIB) y la tarifa crecen a tasas esperadas, y los niveles de desempeño permanecen constantes. Bajo dichos supuestos, el índice de vulnerabilidad se incrementa 6.5 puntos: de 125.9 a 132.4.

Figura 2. Identificación de medidas de adaptación (escenarios)

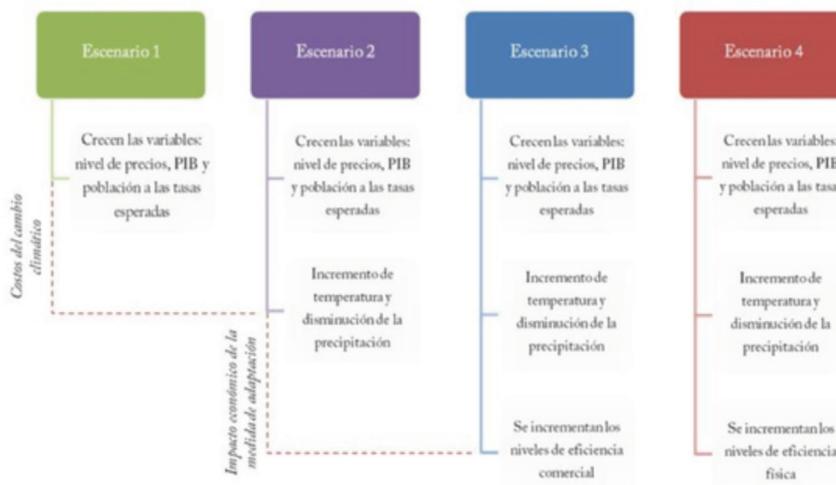


Ilustración 2. Identificación de medidas de adaptación (escenarios).

Escenario 2. Corresponde al escenario con cambio climático, semejante al escenario base. El PIB, el precio y la tarifa, crecen a tasas esperadas, mientras que los niveles de desempeño permanecen constantes. El

índice de vulnerabilidad se incrementa en promedio 8.5 puntos, dos puntos más que en el escenario base. En la ilustración 3 se muestra la proyección del índice de vulnerabilidad en este escenario.

Figura 3. Índice de vulnerabilidad. Escenario 2

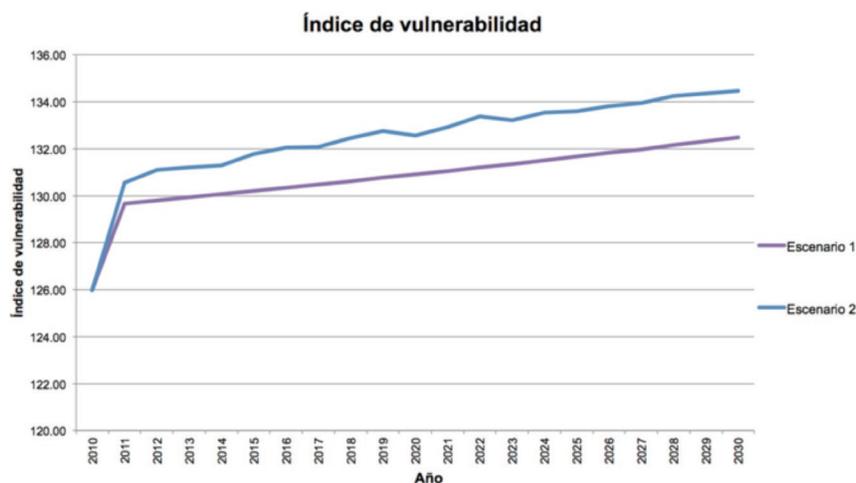


Ilustración 3. Índice de vulnerabilidad. Escenario 2.

Aquí se considera una diferencia de los costos de producción respecto al escenario base, la cual se da por los cambios de

temperatura que se incrementa con el tiempo, al igual que los costos, como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Costos totales. Escenario 2.

Año	Costos totales (millones de pesos)	Año	Costos totales (millones de pesos)	Año	Costos totales (millones de pesos)
2010	950.46	2017	1 300.32	2024	1 731.90
2011	1 010.70	2018	1 360.70	2025	1 796.58
2012	1 059.20	2019	1 420.46	2026	1 871.28

2013	1 101.50	2020	1 466.27	2027	1 943.94
2014	1 145.03	2021	1 533.58	2028	2 027.34
2015	1 201.51	2022	1 606.19	2029	2 105.18
2016	1 253.30	2023	1 656.97	2030	2 185.37

Escenario 3. Este escenario plantea aumentar la eficiencia comercial de 79 a 85%, ya que se busca mejorar la cobranza y aumentar la recaudación del organismo operador, de manera que se cuenten con excedentes monetarios que permitan hacer frente a las nuevas condiciones impuestas por un escenario de cambio climático. El índice de vulnerabilidad se incrementa en cerca de 7.5 puntos, tomando como referencia el valor al 2010; un punto menos que el escenario de cambio climático.

Escenario 4. El escenario 4 corresponde a un incremento de la eficiencia física de 87 a 90%, que se traduce en una reducción del

agua no contabilizada y, por lo tanto, en volúmenes de producción menores a los considerados en un escenario de cambio climático. La ilustración 4 muestra la proyección del índice de vulnerabilidad.

Dado el incremento porcentual de la eficiencia física y comercial, el efecto de disminución de la vulnerabilidad es ligeramente mayor que en los escenarios 2 y 3.

En este escenario los costos totales incluyen las inversiones realizadas por reparación de fugas; sin embargo, es posible observar que aun con el incremento de costos se obtienen ahorros respecto al es-

Figura 4. Índice de vulnerabilidad. Escenario 4

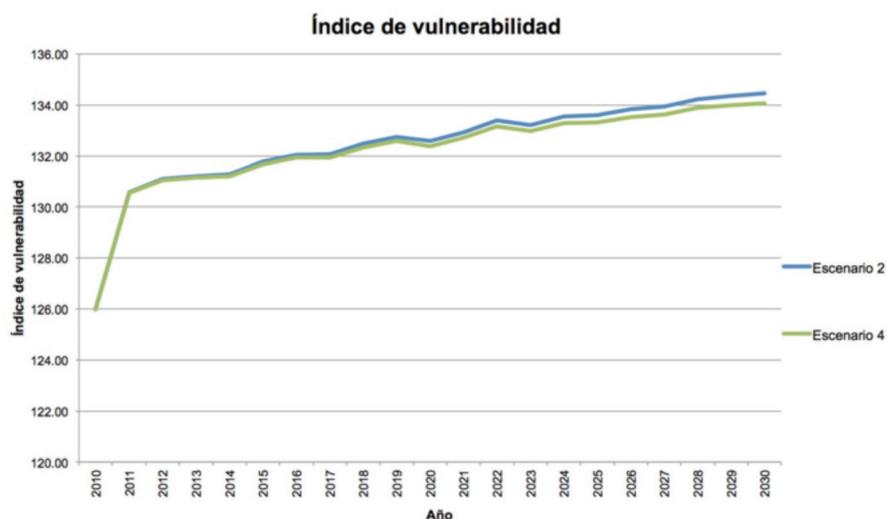


Ilustración 4. Índice de vulnerabilidad. Escenario 4.

cenario sin adaptación ya que, como se ha mencionado, el volumen a producir resulta menor, por lo que los costos de producción, administración y cobranza disminuyen, generando beneficios económicos.

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se describió la propuesta metodológica que tiene como objetivo cal-

cular los costos de adaptación al cambio climático para un organismo operador de agua potable, alcantarillado y saneamiento. La principal aportación de este trabajo es relacionar el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático con la vulnerabilidad ya que, si bien la adaptación tiene un costo, los factores de sensibilidad y capacidad de adaptación considerados en el análisis de sensibilidad son los que

Tabla 3. Costos totales. Escenario 4.

Año	Costos totales (millones de pesos)	Año	Costos totales (millones de pesos)	Año	Costos totales (millones de pesos)
2010	950.46	2017	1 297.97	2024	1 722.83
2011	1 011.71	2018	1 357.57	2025	1 786.28
2012	1 059.77	2019	1 416.51	2026	1 859.62
2013	1 101.59	2020	1 461.50	2027	1 930.85
2014	1 144.59	2021	1 527.83	2028	2 012.66
2015	1 200.48	2022	1 599.35	2029	2 088.89
2016	1 251.63	2023	1 649.13	2030	2 167.36

determinan la magnitud de los efectos que un mismo fenómeno climático pueda causar, por lo cual resulta fundamental conocer los factores que vuelven susceptible a un organismo operador, a fin de moderar los daños potenciales y enfrentar las consecuencias de este.

Bibliografía

- Gujarati, D. (2003). *Econometría*. México: MacGraw Hill.
- IPCC (2007). *Cambio Climático 2007, Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*. Ginebra: IPCC.
- Martínez Austria, P. F. (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante*

el cambio climático. Jiutepec: IMTA-Semarnat.

WUCA (2010). *Decision Support Planning Methods: Incorporating Climate Change Uncertainties into Water Planning*. Denver: WUCA.

Resumen curricular

Héctor David Camacho González. Ingeniero civil por el Instituto Politécnico Nacional (1999), maestría en Gestión Integral del Agua por la Universidad Nacional Autónoma de México (2005) y doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo por el Instituto Politécnico Nacional (2012). Especialidad en el IMTA: evaluación económica de proyectos; planeación.

ESTUDIO PARA LA CARACTERIZACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE SEGURIDAD DE OCHO PRESAS, CLASIFICADAS CON ALTO RIESGO

V. Alcocer, R. Flores, J. A. González, J. Avilés, J. Espinoza, J. Brena,
C. Castillo, J. Balancán y R. Gontes

Resumen

Este artículo presenta los resultados de la caracterización y diagnóstico de la integridad estructural y opciones de rehabilitación de ocho presas clasificadas como de alto riesgo.

Los objetivos del estudio fueron conocer el estado físico, funcional y operativo de los componentes de las presas, así como determinar las condiciones que puedan representar peligro a la propia presa, a la población, sus bienes o a la infraestructura ubicada aguas abajo. Lo anterior, con base en las inspecciones directas a las presas; en trabajos de ingeniería especializada mediante análisis hidrológicos, estructurales, geotécnicos, hidráulicos y, en su caso, de otros campos tales como mecánicos, electromecánicos o ambientales.

Para cada una de las presas se realizaron: 1) visitas de inspección nivel II, 2) trabajos de campo como topografía, batimetría, pruebas geotécnicas de campo y laboratorio, 3) análisis y revisión hidrológica, 4) simulación de peligro sísmico, 5) análisis de la estabilidad de la estructura, 6) revisiones funcional-operacional de la cortina,

7) delimitación de zonas de peligro y 8) planteamiento de propuestas de solución para seguir utilizando la presa en condiciones de operación.

Introducción

La infraestructura hidráulica de nuestro país incluye presas y bordos, los cuales durante la temporada de lluvias, o incluso durante su operación normal, pueden presentar situaciones de peligro de falla en sus estructuras y, en consecuencia, daños a la población, a sus bienes e infraestructura ubicada aguas abajo. Esta situación puede originarse en caso de un vertido normal, desbordamiento, por incapacidad de la obra de excedencias, ruptura o falla total de la cortina.

El peligro de falla se incrementa por el envejecimiento de dichas estructuras, el diseño inadecuado y la falta de conservación. Por ello, el gobierno federal en el marco del Compromiso 51 del pacto por México, a través de la Conagua formuló un proyecto para estudiar y revisar las condiciones de seguridad que guardan ocho de las 115 presas clasificadas como de “alto riesgo”.

Este proyecto consistió en la realización de los estudios necesarios en ocho presas del país ubicadas en los estados de México, Guerrero, Oaxaca y Jalisco, para inspeccionar y analizar las condiciones físicas, funcionales y operativas de sus estructuras, a fin de caracterizar su nivel de seguridad y, en su caso, analizar opciones de rehabilitación y ejecutar los trabajos requeridos.

Resultados

Derivado de los trabajos efectuados se encontró lo siguiente:

Estado de México

En la presa Madín, desde el punto de vista estructural, la cortina y elementos que la complementan (galerías, obra de exceden-

cias y de toma) presentan un buen estado funcional. La obra de excedencias, vertedor y compuertas se encuentran en regular estado estructural, requiriéndose la sustitución de los malacates que ya cumplieron su vida útil. La presa resultó ser hidrológicamente segura, pero el vertedor no debe operar, ya que el cauce aguas abajo no tiene la capacidad suficiente para conducir más allá de 20 m³/s. Abajo de la presa Madín se ubica una gran cantidad de asentamientos humanos aledaños, entre los que destacan el área industrial de la ciudad de Tlalnepantla y fraccionamientos residenciales (ilustración 1). Es prioritario que se revisen las recomendaciones para la operación emitidas por el Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulica, considerando la disminución de la capacidad del embalse, de acuerdo con la batimetría levantada en años recientes.

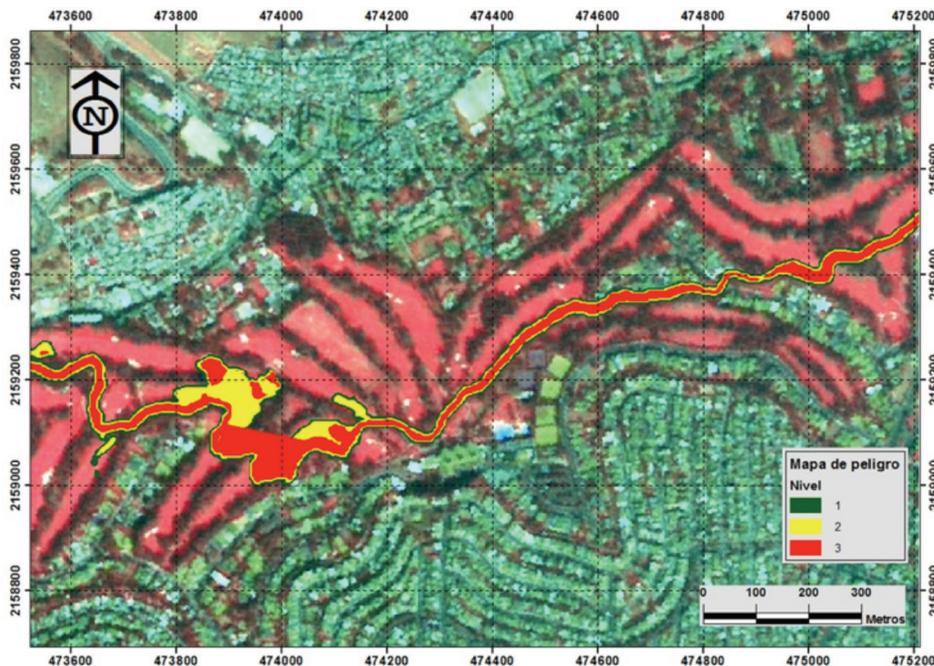


Ilustración 1. Mapa de peligro aguas abajo de la presa Madín para un gasto de 20 m³/s (zona 2). Muestra que el flujo desborda a la altura del Club de Golf Bellavista y el peligro que pudiera presentarse sería el uso de las instalaciones deportivas, en caso de una contingencia de un evento hidrológico.

La presa Angulo resultó ser hidrológicamente insegura, con una disminución de la capacidad reguladora del vaso a través del tiempo. La revisión funcional y operacional concluye que la obra de descarga actual trabaja inadecuadamente, afectando a las viviendas ubicadas aguas abajo. Se propone el dragado del azolve para recuperar parte de la regulación del vaso; asimismo, la construcción de un vertedor cuyos gastos tendrán que encauzarse hacia el emisor poniente. El análisis de estabilidad sugiere reforzar la cortina con adición de contrafuertes y operacionalmente requiere proyectarse una obra de excedencias con capacidad suficiente para hacer de la obra hidrológica e hidráulicamente segura.

La presa Guadalupe presentó falta de mantenimiento con acumulación de basura y vegetación, problemas con el enrocamiento de la cortina (debido a movimientos de piezas de roca aguas arriba) y desconchamiento del vertedor. Hidrológicamente es segura, ya que los niveles máximos de la superficie libre del agua no rebasan el nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) hasta para 10 000 años de periodo de retorno. Estructuralmente es estable, ya que para la condición de flujo establecido y vaciado rápido se determinaron factores de seguridad superiores a los recomendados por la Conagua. En cuanto al análisis dinámico, se generaron acelerogramas horizontales y verticales, compatibles con los espectros de peligro uniforme para terreno firme en el Valle de México, para 125 y 475 años de periodo de retorno, respectivamente, determinándose que no habrá problemas de falla por deslizamiento en la presa.

Los problemas hidráulicos con la operación de esta obra se asocian con la capacidad

de conducción del cauce del río Cuautitlán, antes de su intersección con el emisor poniente, por lo que es necesario rectificar una zona del río, así como el retiro de una estructura ubicada antes de la confluencia con dicho emisor.

La presa San Juan de las Manzanas resultó ser hidrológicamente insegura, por lo que se requiere construir un vertedor de longitud de 30 m con la cresta a 1 m por debajo de la corona de la cortina. Con el fin de no interferir y dañar, en su caso, las vialidades hacia aguas abajo de la presa cuando descargue el vertedor, se proyecta la construcción de un puente con un claro de 12 m y la sección de cruce con ancho de plantilla de 2 m y taludes 1.5:1 (H:V). Dicho puente se localizaría en la carretera que comunica a la localidad de Ixtlahuaca de Rayón con la localidad de San Juan de las Manzanas.

La cortina tiene problemas geotécnicos, dada la pobre resistencia del material térrero obtenida en la campaña de exploración geotécnica y los resultados de la prueba de penetración estándar, por lo que es importante la rehabilitación de la corona de la cortina en 2 m de espesor y recolocación de material con compactación adecuada, así como la construcción de una berma en el talud aguas abajo (ilustración 2).

Oaxaca

La presa La Cantera no es hidrológicamente segura para las condiciones actuales, lo cual requiere incrementar la capacidad del vertedor. Se propone aumentar 4 m la longitud de la cresta; es decir, $L = 31$ m, y con ello dejar pasar la avenida con gasto pico de $Q = 142.80$ m³/s para el periodo de



Ilustración 2. Cortina de la presa San Juan de las Manzanas.

retorno de 10 000 años. También, no es recomendable sobreelevar la cortina, ya que la presencia del cuerpo de azolve sobre el talud aguas abajo de la cortina impide esa opción.

A partir de los resultados de la inspección nivel II, la presa presentó anomalías en los taludes (cortes, erosiones y sobrecargas) que generan condiciones inestables bajo análisis de carga sísmica. Para disminuir el nivel de riesgo debido a esta condición, se propone reducir la inclinación del talud exterior del cuerpo de azolve a un ángulo de 27° (2H:1V), con respecto a la horizontal, compensado el suelo de azolve excavado con las partes en donde hay cárcavas y fuertes irregularidades en la pendiente del talud. Esta presa es una obra hidráulica de gran importancia y utilidad para los habitantes del municipio. Volver a ponerla en

operación requiere la elaboración y ejecución de un proyecto ejecutivo de rehabilitación integral que debe coordinarse entre los usuarios y las autoridades (Conagua).

La presa La Rosita no es hidrológicamente segura, por lo que es necesario modificar sustancialmente las dimensiones del vertedor para la avenida máxima para un periodo de retorno de 10 000 años. De no realizarse dicho redimensionamiento, se deben atender los problemas estructurales por asentamientos en la zona de la cresta que ha generado agrietamientos en la mampostería, así como los problemas de socavación.

Desde el punto de vista de su estabilidad geotécnica y estructural, el nivel de peligro que presenta la cortina es “Bajo”, porque ha estado y está en condiciones de opera-

ción normales, sin manifestaciones o indicadores de inseguridad incipiente. Los análisis resultantes del análisis de estabilidad con diferentes métodos y escenarios muestran un peligro con bajo potencial de que se presenten problemas de deslizamiento.

No obstante, se encontraron anomalías en la obra de toma. Existen fugas en la conducción que podrían causar debilitamientos locales del suelo de la cortina, en particular al pie del respaldo aguas abajo. La rehabilitación de esta requiere tanto de acciones estructurales como de operación, a fin de evitar las filtraciones en la zona aledaña a su descarga, motivo por el que la presa se calificara como de “Alto” riesgo.

Jalisco

La presa Las Rusias es hidrológicamente segura, sin problemas potenciales por desbordamiento. Se encontraron problemas de invasión del vaso con construcciones ocupadas durante la época seca, invasión del cauce con construcciones permanentes y falta de mantenimiento general a la presa. El riesgo encontrado es principalmente estructural y operacional.

Para tenerla en estado funcional y sin riesgo, se recomiendan las siguientes acciones: retirar las construcciones dentro del vaso y delimitar físicamente la zona federal, desmontar completamente ambos taludes para dejar una superficie que presen-

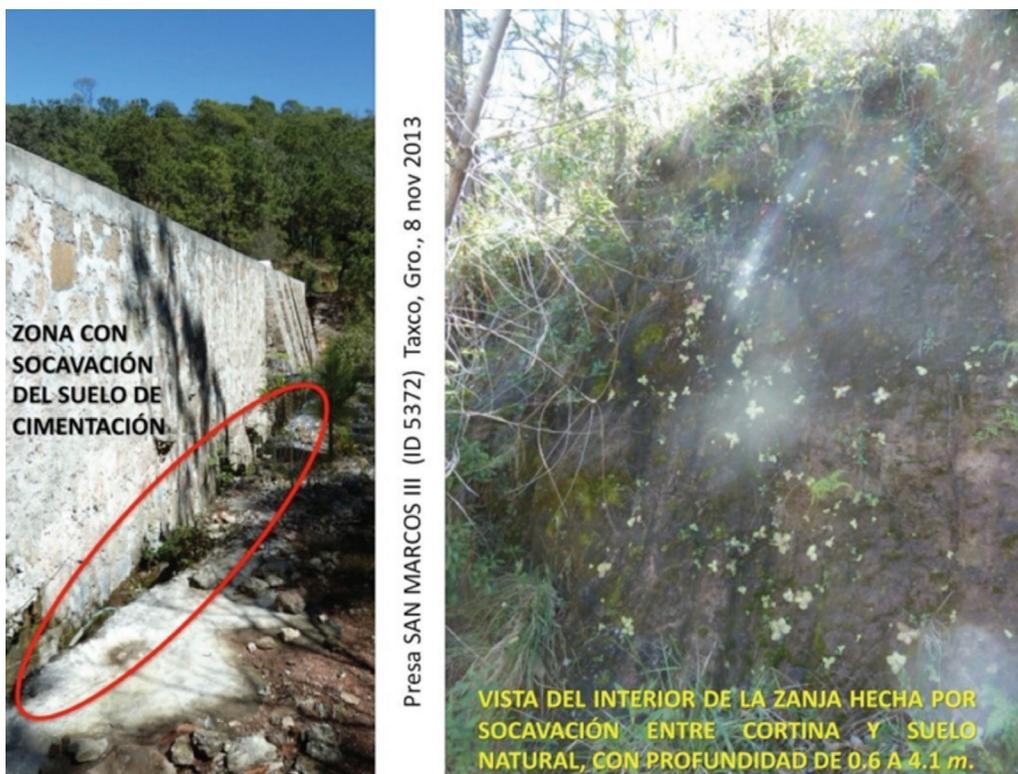


Ilustración 3. Zona con socavación del suelo de la cimentación en la presa San Marcos III.

te protección contra la erosión, reponer el enrocamiento faltante en el talud aguas arriba y protegerlo contra la erosión, rellenar depresiones y baches en la corona mediante trabajos de nivelación, inhabilitar las descargas laterales y poner en funcionamiento el desfogue de fondo.

Guerrero

La presa San Marcos III no es capaz de regular avenidas mayores a dos años del periodo de retorno, por tanto la presa no es segura hidrológicamente. Si bien pueden tenerse descargas a través de la cortina, su funcionamiento podría significar un riesgo importante por la erosión presentada al pie de la misma.

La cortina se encontró en regulares condiciones geomecánicas y estructurales, con peligro en la cimentación debido a una importante socavación, a todo lo largo de sus 71.8 m de longitud de la base de la cortina (ilustración 3). También, se observan efectos de erosión en los empotramientos, en particular del lado de la margen derecha. La rehabilitación de la presa consistiría en rellenar el hueco de roca erosionada con mampostería y la ampliación del vertedor para regular una avenida con un periodo de retorno de 500 años, con gasto máximo de 16 m³/s.

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de la caracterización y diagnóstico de la integridad estructural y opciones de rehabilitación de ocho presas, en general presentaron problemas con riesgos hidrológicos, insuficiencias o inexistencia del vertedor; actualización de políticas de operación y a la falta de capacidad de

conducción, deslizamientos, socavación y erosión en la cortina y taludes.

Hidrológicamente, la mitad de ellas son seguras (presas Madín, Guadalupe, Angulo y Las Rusias). Desde el punto de vista de su estabilidad geotécnica y estructural, se encontró que las presas Angulo, San Juan de las Manzanas, San Marcos y La Cantera presentan fallas en la cortina y requieren una rehabilitación más integral.

Como resultado de la caracterización de zonas de riesgo con peligro de inundación, se identificó la falta de delimitación de zonas federales que puedan representar afectación de las poblaciones aledañas en presas como Guadalupe, Madín, San Juan de las Manzanas y La Cantera.

Bibliografía

- Aparicio, M. F. J. (2005). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Archivo Histórico del Agua (1976). Vista del vaso de la presa. México: Archivo Histórico del Agua. Caja 277. Expediente 7857 y 7861.
- Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (2010). *Normas para la seguridad de presas*. Panamá.
- Campos, D. *Aproximación empírica a la solución bivariada de avenidas de diseño en embalses sin hidrometría*. México: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de San Luis Potosí.
- Comisión Nacional del Agua (1987). *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de una zona federal*. México.

Del Blanco, M. et al. (2010). *Modelación matemática y física de un vertedor*. Argentina: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata.

Koolhaas, M. (2012). *Estructuras hidráulicas para riego*. Brasil.

Krasowky, J. y Lozoya, J. O. (2009). Informe de visita de inspección Nivel II a la presa Guadalupe. México: Comisión Nacional del Agua. Sistema de Información de Seguridad de Presas. Archivo CT1M0901.

Morlan, M. F. (2012). *Saneamiento del río Cuautitlán en el tramo cortina-presa Guadalupe-Residencial La Luz*. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. México: Instituto Politécnico Nacional.

Paredes, J. y Trueba, V. (2011). *Informe de inspección de seguridad Nivel I de la presa El Moral*. México: Comisión Nacional del Agua. Sistema de Información de Seguridad de Presas. Archivo IVISIINGEN.

Ramírez, E. (2011). Informe de inspección de seguridad. México: Comisión Nacional del Agua. Sistema de Información de Seguridad de Presas. Archivo CT5M1101.

Resumen curricular

Víctor Hugo Alcocer Yamanaka. Ingeniero civil por el Tecnológico de Zacatepec (1998), maestro en Ingeniería (Hidráulica, 2001) y doctor en Ingeniería (Hidráulica, 2007) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas principales de investigación: modelación hidráulica y transporte de solutos en redes de distribución de agua potable, procesos estocásticos, esquemas de desagregación espacial y temporal, uso eficiente del agua en ciudades e industria y técnicas de optimización multiobjetivo.

Rául Flores Berrones. Ingeniero civil por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (1965), maestro en Ciencias por la Universidad de Harvard, EUA (1969), doctor en Ingeniería (1975) por la UNAM y posdoctorado por el Instituto Politécnico de Rensselaer, EUA (1992). Líneas de investigación: dinámica de suelos, diseño de tuberías sujetas a sismos, flujo de agua a través de presas y bordos, seguridad de presas, geotecnia ambiental aplicada al diseño y construcción de plantas de tratamiento, desechos de sólidos y análisis sísmico de presas.

José Alfredo González Verdugo. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Sinaloa (1982) y maestro en Ingeniería Hidráulica por la Universidad Nacional Autónoma de México (1991). Líneas de investigación: modelación física de obras hidráulicas, dispersión de contaminantes en ríos y lagos, caracterización y control de la calidad del agua de cuerpos de agua eutroficados, resuspensión y transporte de sedimentos en lagos someros.

María Joselina Espinoza Ayala. Ingeniera civil por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (1979), maestra en Ingeniería (Hidráulica, 1985) y doctora en Ingeniería (Hidráulica, 2001) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: desarrollo de modelos hidráulicos y técnicas experimentales en la solución de problemas complejos para mejorar el diseño de obras hidráulicas-hidráulica fluvial, procesos de transporte de sedimentos, morfología de ríos-mecánica de fluidos, turbulencia.

Javier Avilés López. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Puebla (1978),

maestro en Ingeniería (Estructuras, 1981) y doctor en Ingeniería (Estructuras, 1985) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: aislamiento de cimentaciones, vibraciones de cimentaciones para maquinaria, presiones hidrodinámicas en presas, efectos de sitio y de interacción suelo-estructura, evaluación de peligro sísmico y criterios de diseño sísmico.

Jorge Brena Zepeda. Licenciado en Geografía (1980) y maestro en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: desarrollo, adecuación, transferencia y aplicación de métodos digitales de trabajo para la evaluación de recursos naturales en cuencas, mediante el empleo de imágenes de satélite y sistemas de información geográfica.

Cervando Castillo Romano. Ingeniero geofísico por el Instituto Politécnico Nacional (1983). Especialidad en Investigación Educativa por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Diplomados en Sistemas de Información Geográfica por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1990) y en Prospectiva de la Investigación Científica por la Universidad Nacional Autónoma de México (1996). Líneas de investigación: estudios sobre la dinámica de la

vegetación y del recurso agua en cuencas hidrológicas, modelado de cuencas y análisis prospectivos de la dinámica de la vegetación y creación de base de datos para la toma de decisiones en el manejo de recursos naturales.

José Alberto Balancán Soberanis. Ingeniero geofísico (1987) y maestro en Geografía (Evaluación y conservación de recursos, 1998) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: especialista en diseño y desarrollo de aplicaciones en sistemas de información geográfica y sensores remotos, orientados a la gestión integral de los recursos naturales y el medioambiente.

Rocío Gontes Ballesteros. Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, Especialidad en Agua, por la Universidad Autónoma Metropolitana de Iztapalapa, y maestría en Ingeniería Química, Especialidad en Contaminación, por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Líneas de investigación: apoyo en la organización y coordinación de eventos para la formación de recursos humanos en obras hidráulicas, conservación de los recursos naturales agua y suelo, problemas de contaminación de agua de riego, aprovechamiento de aguas residuales y monitoreo y análisis de agua.

ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DE VIENTO SUPERFICIAL, HUMEDAD RELATIVA, HUMEDAD ESPECÍFICA Y PRESIÓN SUPERFICIAL EN UN PERIODO HISTÓRICO Y BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN DOS PERIODOS FUTUROS

A. Salinas, E. Mateos, G. Colorado, M. Montero, M. E. Maya y M. González

Resumen

Utilizando simulaciones numéricas de los modelos globales del experimento CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 5), se evaluó el impacto potencial de cambio climático en México bajo condiciones de tres escenarios, que permita emprender acciones de adaptación al clima actual y a su posible cambio en regiones de interés para la Comisión Federal de Electricidad.

Los periodos analizados son: el histórico, 1979-2010, y los escenarios de emisiones de gases de efecto de invernadero (RCP45, RCP60 y RCP85), dos periodos del siglo XXI, 2015-2039 y 2075-2099. La ventana espacial a analizar es de 0 a 35N y de 70W a 130W. Para estimar el desempeño de los modelos por región, se utilizó la base de datos NARR (North American Regional Reanalysis), integrando las simulaciones

mediante un ensamble ponderado llamado REA (Reliability Ensemble Averaging).

Introducción

El sistema climático terrestre recibe energía solar como forzante primario. La interacción de la atmósfera con los océanos, continentes y hielos polares genera las condiciones climáticas que conocemos, producto de procesos dinámicos (movimientos de masas atmosféricas y oceánicas) y energéticos (reflexión, absorción y emisión dentro en la atmósfera y el océano). El efecto invernadero en la atmósfera ha permitido adquirir las condiciones propicias para la vida en el planeta, desde su formación. Sin la presencia de los gases de invernadero, como el vapor de agua y el CO₂, la temperatura media de la superficie terrestre sería significativamente menor y, por ende, no existirían las condiciones de vida actuales.

Debido a la variabilidad y al cambio climático se requiere contar con información científica a escala regional con el objetivo de identificar, diseñar y llevar a cabo acciones de mitigación y adaptación ante los posibles impactos negativos y los relacionados con fenómenos hidrometeorológicos extremos. En este sentido, una de las herramientas fundamentales son los escenarios de cambio climático regionalizados, que permiten tener una proyección de las condiciones potenciales del clima futuro bajo ciertos escenarios de emisiones de gases de efecto de invernadero. Estudiar y modelar escenarios de clima y cambio climático, sus variaciones, tendencias, impactos y la evaluación de los modelos, son algunos de los elementos de información principales para la toma de decisiones. Así, es imprescindible fomentar las capacidades técnicas nacionales en cuanto al manejo de información para la generación de escenarios. Su correcta interpretación y aplicación es importante tanto para conocer la vulnerabilidad actual como futura, generando planes estratégicos sustentados.

Para responder las interrogantes científicas derivadas del Cuarto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), bajo el patrocinio del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP, por sus siglas en inglés), se generó el proyecto científico llamado CMIP5. Dichos resultados fueron producidos por centros internacionales de modelación del clima y coordinado por el CMIP5. Este proyecto llevó a cabo un conjunto de experimentos numéricos para estudiar la predecibilidad del clima, explorando alcances y limitaciones de los modelos para reproducirlo a escalas decadales. Se

determinaron los factores por los cuales, ante forzamientos similares, las realizaciones de los modelos produjeron respuestas diferentes, lo que significa que aún hay una gran incertidumbre (Taylor et al., 2011). El CMIP5 aporta algunas respuestas científicas a la problemática del cambio climático. Los modelos globales del clima (MCG) acoplados son herramientas poderosas que toman en cuenta un complejo grupo de procesos, basados en leyes físicas. Con estas herramientas se hacen simulaciones de cambio climático.

La actualización de escenarios de cambio climático en el presente proyecto se basa en información de los modelos de circulación general utilizados en el experimento CMIP5, aplicando un análisis del desempeño de estos modelos numéricos y estableciendo sus alcances y limitaciones de forma sistemática para estimar las condiciones del clima futuro bajo ciertos escenarios de cambio climático. El desempeño de estos modelos para periodos históricos brinda elementos dirigidos a establecer las limitaciones de esta herramienta en la reproducción de procesos atmosféricos de impacto sobre México.

Resultados

Se analizó el desempeño de 16 MCG mediante las métricas: raíz del error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE), desviación estándar (Std) y correlación (r) a escalas anuales y estacionales, para las variables superficiales mensuales: humedad relativa y específica, presión a nivel del mar, precipitación y viento (zonal y meridional). Esto para cinco regiones representativas del país (ilustración 1). Los modelos utilizados poseen resoluciones

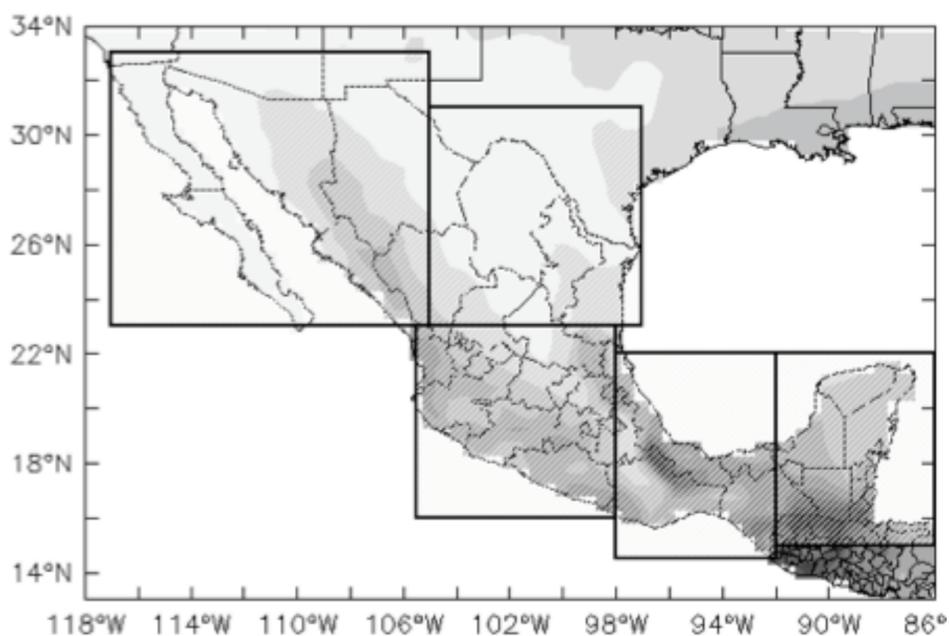


Ilustración 1. Regiones utilizadas para la validación del REA y el análisis de métricas e índices climáticos.

Tabla 1. Los modelos utilizados poseen resoluciones espaciales y temporales diversas.

	Modelo	Nombre	Resolución dlon * dlat	Histórico	RCP45	RCP60	RCP85
1	BCC-csm1-1-m	Beijing Climate Center	1.1 1.1	3	1	1	1
2	CanESM2/	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	2.8 * 2.8	5	5		5
3	CNRM-CM5/	Centre National de Recherches Meteorologiques	1.4 * 1.4	10	1		5
4	CSIRO-Mk3-6-0/	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Org.	1.9 * 1.9	4	4	10	10
5	GFDL-ESM2G/	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2.5 * 2.5	1	1	1	1

6	GISS-E2-H	Meteorological Research Institute, ocean model Hycom	2.5 * 2.0	5	4	1	2
7	GISS-E2-R	Meteorological Research Institute, ocean model Russell	2.5 * 2.0	6	5	1	1
8	HadGEM2-ES/	Met Office Hadley Centre- Earth system model	1.9 *1.25	4	4	4	4
9	HadGem2-AO/	Met Office Hadley Centre- Atmosphere-ocean coupled	2.5 * 2.5	1	1	1	1
10	INMCM4/	Institute for Numerical Mathematics (Russia)	2.0 * 1.5	1	1		1
11	IPSL-CM5A-MR/	Institut Pierre-Simon Laplace	1.9 * 1.2	3	1	1	1
12	MIROC5/	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1.4 * 1.4	5	1	5	5
13	MIROC-ESM/	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2.8 * 2.8	3	3	3	3
14	MIROC-ESM-CHEM/	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2.8 * 2.8	1	1	1	1
15	MRI-CGCM3/	Max-Plank Institute	1.1 1.1	5	1	1	1
16	NorESM1/	Norwegian Climate Center	2.5 * 1.9	3	1	1	1
			Total GCM	16	16	13	16

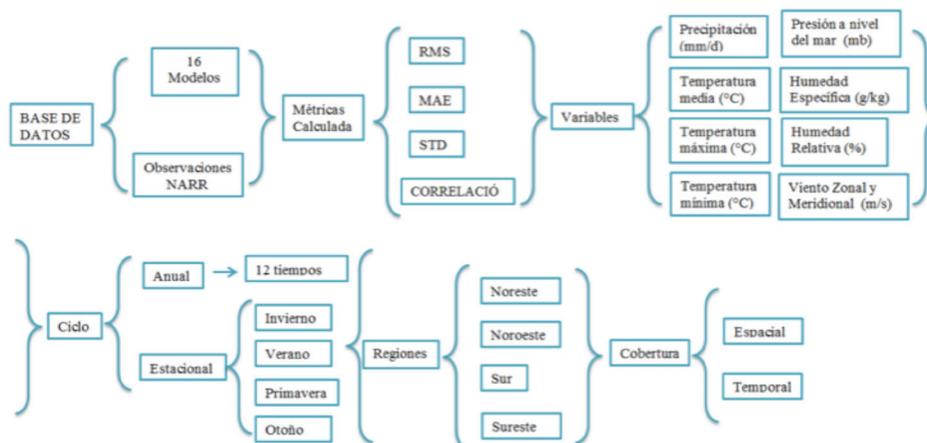


Ilustración 2. Diagrama de flujo. Cálculo del desempeño de modelos globales para el periodo histórico 1979-2010.

espaciales y temporales diversas (tabla 2.). El flujo de información utilizada se muestra en la ilustración 2, donde se observa la fuente de datos y su procesamiento.

El ciclo anual de humedad específica para el periodo histórico, tanto de los modelos como de las observaciones (NARR), se muestra en la ilustración 3, donde se ob-

serva que los máximos entre junio y septiembre, ya que esta variable no es afectada por las variaciones continuas de presión asociadas al paso de eventos de alta y baja frecuencia, la variabilidad temporal se expresa en términos absolutos de masa de agua en la atmósfera referida a masa atmosférica. Por ello, sigue un patrón similar al de la precipitación de la región, en que el

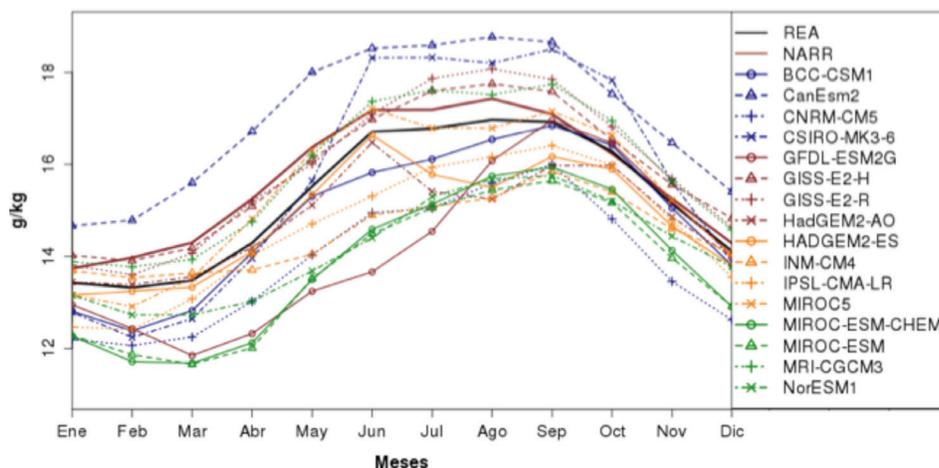


Ilustración 3. Ciclo anual de humedad específica de la región sureste (1979-2010).

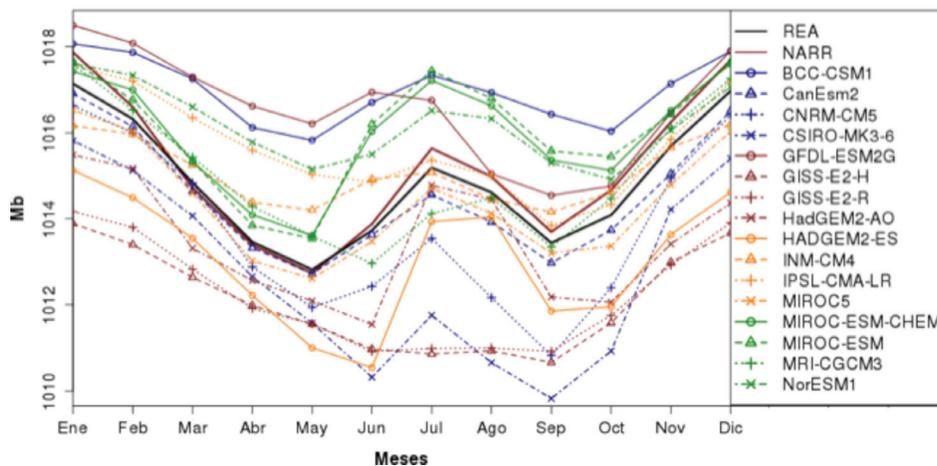


Ilustración 4. Figura 4. Ciclo anual de presión a nivel del mar de la región sureste (1979-2010).

efecto del monzón existe en estos meses. A pesar de la dispersión de las simulaciones respecto a las observaciones de NARR, en éstas se puede identificar un comportamiento cualitativo similar, describiendo el ciclo anual observado, con mayor dispersión en otoño e invierno que en primavera y verano. Algunos modelos describen los máximos y los mínimos en meses diferentes, pero contiguos.

Respecto al ciclo anual de la presión a nivel del mar para el periodo histórico, se observa una disminución en mayo y otra en septiembre (ilustración 4), con un máximo relativo en julio; a menor presión mayor humedad específica. Durante los meses de verano las bajas presiones prevalecen modificando el valor de medio mensual de ésta.

Como indicadores del desempeño de los modelos, se aplicaron para cada una de las cinco áreas las métricas: error medio absoluto y error cuadrático medio. Para la región sureste, la humedad específica muestra que los modelos MRI, MIROC5, GISSH

y BCC son los de mejor desempeño, mientras que los modelos CNRM, GFDL, MIROCESM y MIROCESM son de más bajo desempeño (ilustración 5), con diferencias de 1.2 g/kg hasta 2.5 g/kg.

Asimismo, se calculó el promedio ponderado REA de las simulaciones históricas de los MCG. El ciclo anual de las variables utilizadas del REA se comparó con las observaciones de NARR para el periodo histórico 1979-2010 para la región sureste. Como ejemplo del ensamble, se muestra el ciclo anual de rapidez de viento, tanto para el periodo histórico como en la proyección futura. En los tres escenarios (ilustración 6) se observa una máxima magnitud en abril y una mínima en septiembre y octubre, teniendo durante todo el año valores positivos (viento proveniente del oeste), oscilando entre 1 m/s y 2 m/s. Durante los meses de mayo a septiembre se observa la mayor dispersión entre modelos y respecto a NARR. Entre septiembre y marzo (otoño e invierno), la mayoría de los modelos estiman valores negativos (vientos provenientes del este), mientras que para

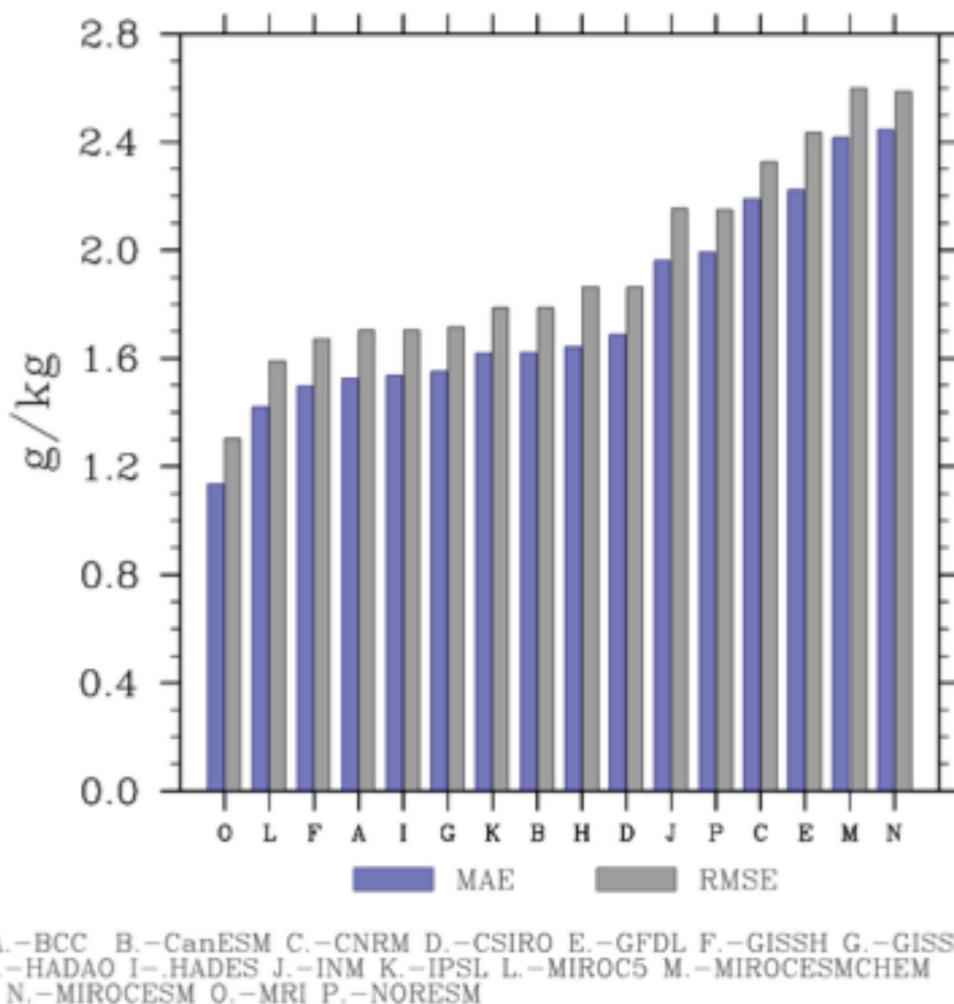


Ilustración 5. Error medio absoluto (MAE) y cuadrático medio (RMSE) para humedad específica, zona Sureste. (1979-2010).

el resto del año vientos positivos. Para la presión a nivel del mar, se observan cambios poco significativos al comparar la proyección total de cambio climático con los datos NARR en los tres escenarios de radiación para el futuro lejano, con una incertidumbre de + 2.5 mb (ilustración 7).

Respecto al ciclo estacional, los porcentajes de cambio de la presión se estiman

entre -.1% y .1% en las cuatro estaciones del año. Considerando que la presión media a nivel del mar es 1013 mb, los cambios son del orden de + 1 mb máximo, (ilustración 8); es decir, incrementos o decrementos poco significativos. En el invierno, el escenario RCP8.5 proyecta que la presión reducida a nivel del mar podría aumentar hasta .1% en la región centro del país, mientras que los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 simulan

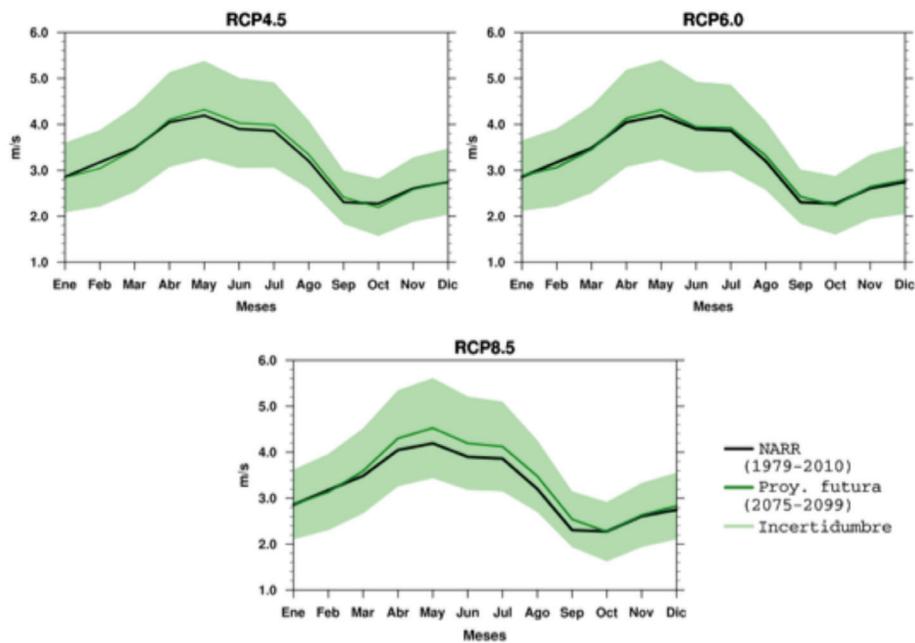


Ilustración 6. Ciclo anual de rapidez de viento superficial en la región sureste (2075-2099). Las observaciones de NARR del periodo 1979-2010 (línea negra) y para la proyección total (línea verde) para el futuro lejano, con su respectiva incertidumbre (área sombreada).

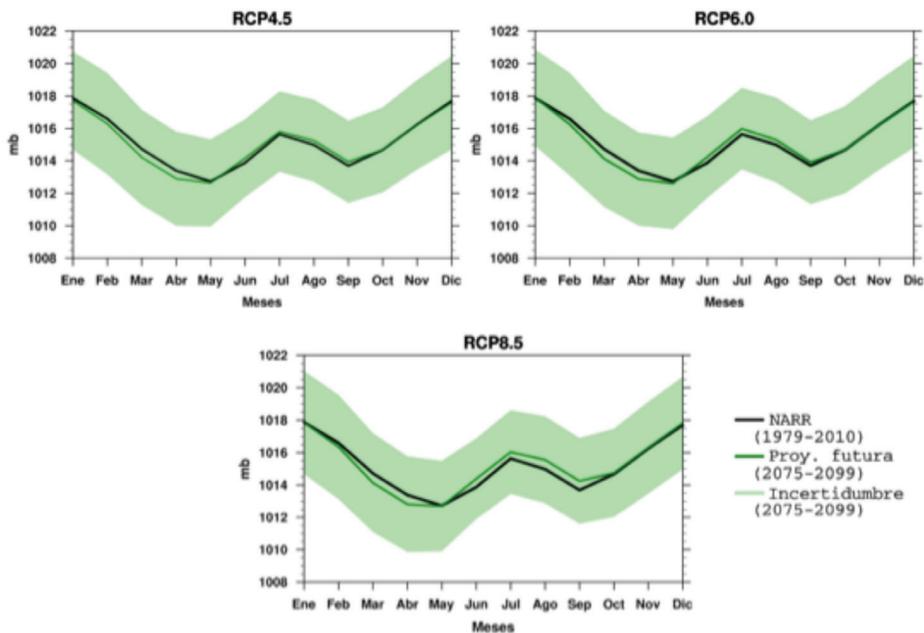


Ilustración 7. Ciclo anual para la presión a nivel del mar en la región sureste (2075-2099). Las observaciones de NARR del periodo 1979-2010 (línea negra) y para la proyección total (línea verde) para el futuro lejano, con su respectiva incertidumbre (área sombreada).

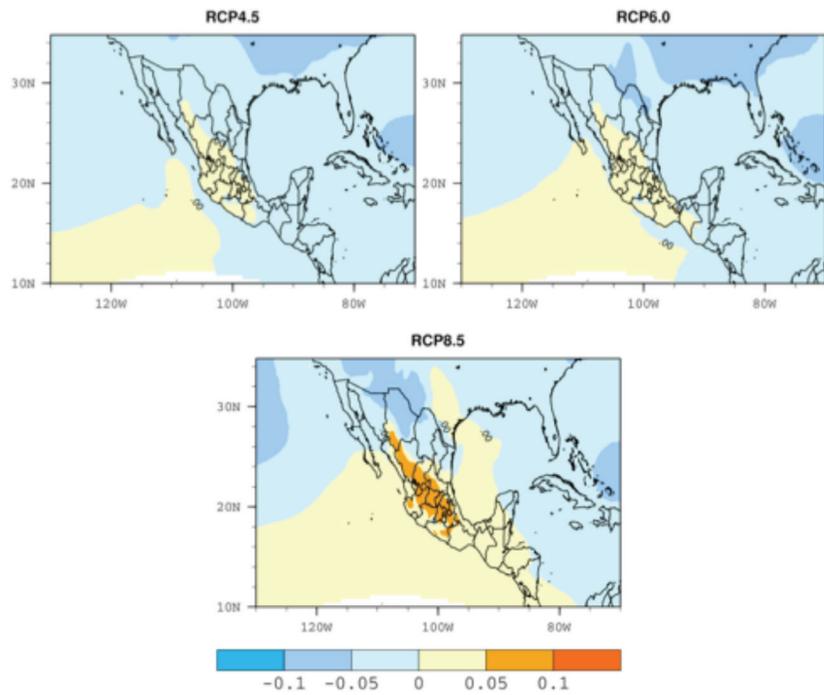


Ilustración 8. Proyección de porcentaje de cambio de la presión reducida a nivel del mar en invierno, periodo 2075-2099.

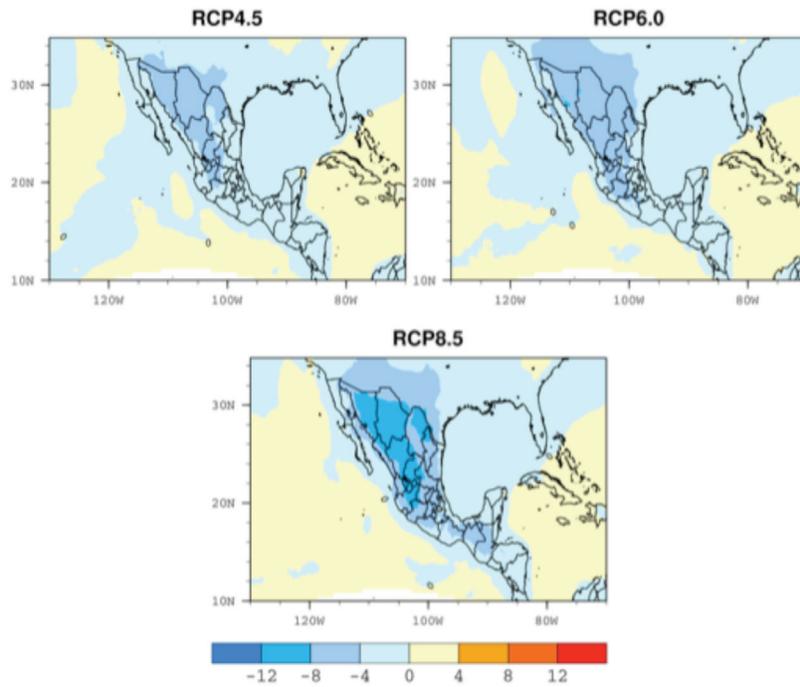


Ilustración 9. Proyección de porcentaje de cambio para humedad relativa en invierno, periodo 2075-2099.

decrementos de hasta 0.05% en la región norte y en las penínsulas de Baja California y Yucatán, así como aumentos del mismo orden en el centro y suroeste del país.

Los tres escenarios de radiación proyectan que la humedad relativa podría disminuir en toda la república mexicana, lo que coincide con lo observado en el ciclo anual de cada región. La región donde se observa mayor decremento (hasta 12% con el escenario RCP8.5), es en la Sierra Madre Occidental, mientras que las penínsulas de Yucatán y Baja California, en los tres escenarios coincide en un posible decremento de hasta 4% (ilustración 9).

Conclusiones y recomendaciones

En la comparación tanto de los modelos globales como de su ensamble (REA), contra los datos del NARR, se observa que no es posible estimar un modelo único como el de mejor desempeño en la reproducción de las cinco variables analizadas. Es decir, el mismo modelo no estima adecuadamente todas las variables. Por ello, se utilizó un ensamble ponderado (método REA) que toma lo mejor de cada modelo disminuyendo sus errores individuales; así, se observó que el REA mejora significativamente la reproducción individual de los modelos.

Al observar las simulaciones históricas del REA, se identificó que en cada variable y en cada región el mejor modelo no siempre es el mismo. Respecto a las simulaciones futuras, para el sureste se proyectó para la humedad específica un aumento de hasta 10%, con una disminución en el sureste, en otoño. En el caso de la humedad relativa en el sureste, las proyecciones simulan que podría disminuir hasta un 10% en primavera.

Para comprender las causas de los errores de los modelos, es fundamental analizar los efectos locales: influencia de la abrupta orografía mexicana en la dinámica atmosférica; efectos de los océanos adyacentes a México en el clima regional; ubicación e intensidad de la precipitación asociada a la zona de convergencia intertropical; intensidad y ubicación de la corriente del Pacífico de niveles altos y su relación energética con los frentes fríos; intensidad y variabilidad estacional de la corriente en chorro de niveles bajos del Caribe y su intercambio energético con las ondas del este, y la reproducción adecuada del inicio e intensidad de la precipitación asociada al Monzón de Norteamérica y su relación con la dinámica local, como los sistemas convectivos de mesoescala y la orografía.

Bibliografía

- CRU (2012). Recuperada de <http://www.cru.uea.ac.uk>.
- Giorgi, F., & Mearns, L. (2001). Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the Reliability Ensemble Averaging (REA) Method. *Journal of Climate*, 15, 1141-1158.
- IPCC (2007). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Marsland, S. J., Haak, H., Jungclaus, J. H., Latif, M., & Roeske, F. (2003). The Max-Planck-Institute Global Ocean/Sea-Ice Model with Orthogonal Curvilinear Coordinates, *Ocean Modelling*, 5, 91-127.
- Montero, M. J. y Pérez, J. L. (2008). Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México. En

P. F. Martínez y A. Aguilar (Eds.), *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*, volumen II (pp. 11-21). Jiutepec: IMTA.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Vuuren, D. P., Carter, T. R., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbancks, T. J. (2010). The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, 463, 747-756.

Salinas, J. A. et al. (2012). Escenarios del REA, productos de la página web y revisión NARCCAP. Tercer Reporte, Parte I: Participación del CICESE, el IMTA y el CCA-UNAM en el desarrollo del proyecto de actualización de escenarios de cambio climático para México, como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional: IMTA-CICESE-INE.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. y Meehl, G. A. (2011). A Summary of the CMIP5 Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*.

Resumen curricular

José Antonio Salinas Prieto. Licenciatura en Ciencias Marinas, maestría en Ciencias Computacionales y doctorado en Física de la Atmósfera. Líneas de investigación: modelación numérica de la atmósfera y oleaje, procesos atmosféricos tropicales de alta frecuencia, variabilidad y cambio climático a escala regional.

Efraín Mateos Farfán. Licenciatura en Oceanología, maestría en Ciencias (Ocea-

nografía Física) y doctorado en Oceanografía Física. Líneas de investigación: dinámica de costas y bahías, modelación numérica del océano, interacción océano atmósfera.

Gabriela Colorado Ruiz. Licenciatura en Ciencias Atmosféricas y maestría en Oceanografía Física. Líneas de investigación: modelación numérica de la atmósfera y el océano, impacto del cambio climático a escala regional, reducción de escala de proyecciones de cambio climático.

Martín José Montero Martínez. Licenciatura en Física, maestría en Ciencias (Geofísica), doctorado en Ciencias (Ciencias de la Atmósfera) y posdoctorado. Líneas de investigación: cambio climático global y regional, reducción de escala de modelos climáticos, climatología de tormentas, efectos aerosol-clima y vegetación clima, percepción remota aplicada a detección de fuegos.

María Eugenia Maya Magaña. Licenciatura en Ingeniería en Hidrología y maestría en Ingeniería Civil. Líneas de investigación: hidrología, sistemas de información geográfica, cambio climático.

Maura González Robles. Licenciatura en Ciencias Atmosféricas y maestría en Teledetección. Líneas de investigación: estimación y análisis de eventos atmosféricos extremos, estudios de cambio climático regional, variabilidad climática en México.

ESTUDIO PARA LA DETECCIÓN DE FUENTES CONTAMINANTES POR DESCARGAS DE AGUA RESIDUAL AL RÍO ATOYAC, ENTRE LA CIUDAD DE OAXACA Y LA PRESA PASO ANCHO

J. Izurieta, P. Alonso, Y. Pica, P. Rivera, G. Mantilla, A. Ramírez y L. Bravo

Resumen

Se efectuó un diagnóstico de la calidad del agua en la cuenca alta del río Atoyac, donde se asienta la ciudad de Oaxaca, desde su nacimiento hasta el sitio denominado “Paso Ancho”, con apoyo de una campaña de muestreo en cuarenta sitios en río, afluentes y descargas. Se determinaron en campo y laboratorio más de treinta parámetros de calidad del agua entre convencionales y no convencionales, así como indicadores biológicos y toxicidad.

Con respecto a la calidad del agua en el río Atoyac y considerando los criterios de calidad del agua vigentes, las zonas críticas de contaminación del río Atoyac se presentan desde el Fraccionamiento Esmeralda, en la zona conurbada de la ciudad de Oaxaca, hasta Zimatlán y, en el río Salado, desde Santa María del Tule hasta su confluencia con el río Atoyac. Lo anterior está asociado con el hecho de que la infraestructura de 21 plantas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca tiene serias deficiencias en su operación y mantenimiento;

incumplen la normativa vigente para descargas en varios parámetros. No obstante, el río tiene una gran capacidad de depuración: en el recorrido hasta el sitio Paso Ancho existe el aporte de dos afluentes importantes y la incorporación de aguas provenientes de manantiales. El río Atoyac, en este sitio, presenta condiciones de calidad del agua aceptables. Con información sobre la calidad del agua y el levantamiento de secciones y aforos, se modeló la calidad del agua para las condiciones encontradas durante el muestreo, así como las condiciones de cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996. Se estimó el aporte de nutrientes en la parte baja de la zona de estudio, determinándose la carga media anual de nutrientes y sedimento que estaría recibiendo el embalse en caso de que fuere construido. Con esta información sería posible estimar el nivel de eutrofización que tendría el cuerpo de agua.

Introducción

Los ríos Atoyac y Salado presentan alteración en su calidad del agua atribuible a los

desarrollos agrícola, industrial y socioeconómico, así como a los altos niveles de deforestación en sus cuencas de aportación. En estas subcuencas se asienta, aproximadamente, el 50% de la población del estado de Oaxaca. El 13% de los 61 municipios en estas subcuencas presenta un grado de marginación muy alto, el 13% alto, el 36% medio, el 26% bajo y el 11% muy bajo. A la fecha, no existe un estudio que permita conocer las principales fuentes de aportación puntuales de contaminación a estas corrientes. El conocimiento de la capacidad de asimilación y dilución permite determinar las cargas máximas de contaminantes que puede captar un cuerpo receptor sin alterar las metas de calidad, en función del uso que tiene asignado el cuerpo receptor. Conocer lo anterior es sumamente importante, ya que con esta información se pueden definir las características de los sistemas de tratamiento de las descargas en estas subcuencas, de manera que se cumplan los criterios de calidad vigentes.

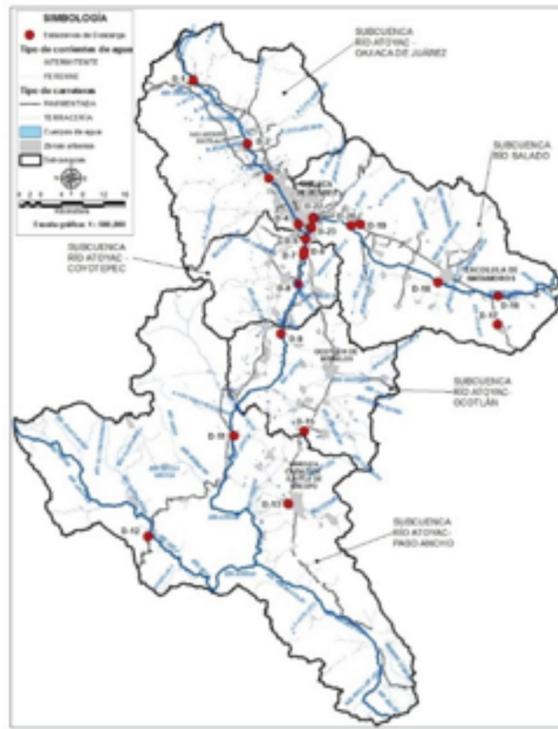
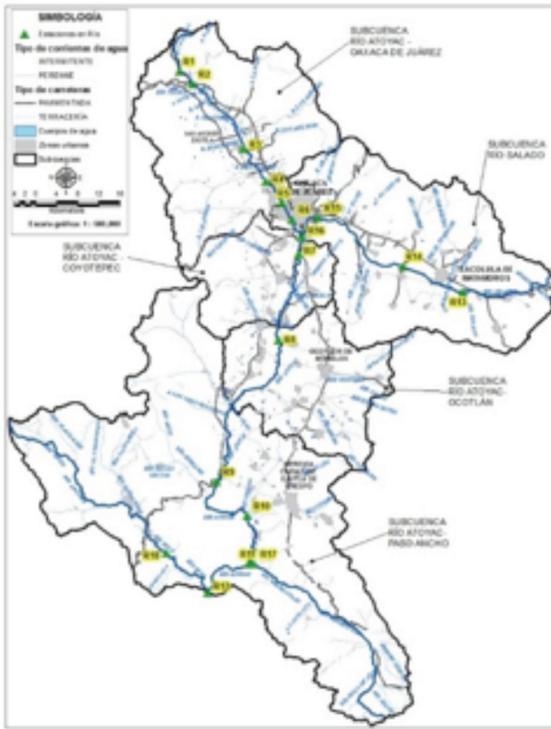
Resultados

La calidad del agua en el río Atoyac y considerando los criterios de calidad del agua de la Conagua para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST), presenta su zona crítica en el tramo que forma la parte conurbada de la ciudad de Oaxaca, tanto en la parte del río Atoyac como en el río Salado, desde el Fraccionamiento Esmeralda hasta Zimatlán, en el caso de la DBO, y hasta Zabache, en el caso de la DQO. En el río Salado la problemática se presente desde Santa María del Tule hasta la confluencia, y en la parte alta desde las comunidades de Mitla y Matatlán hasta Tlacolula, con respecto

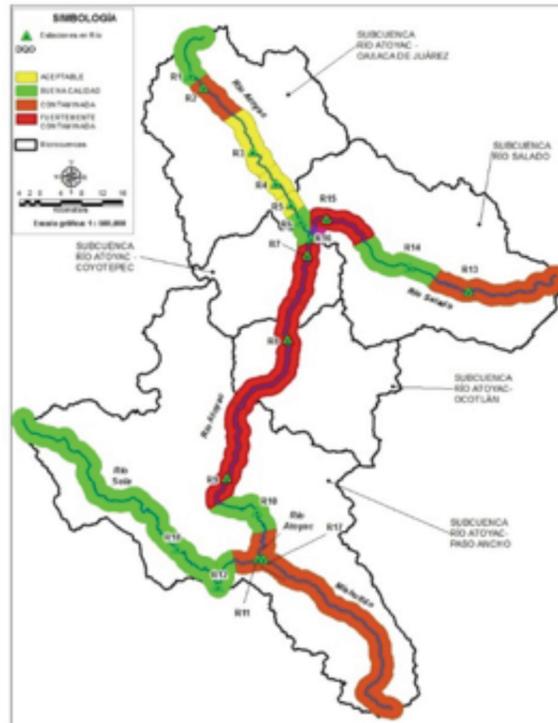
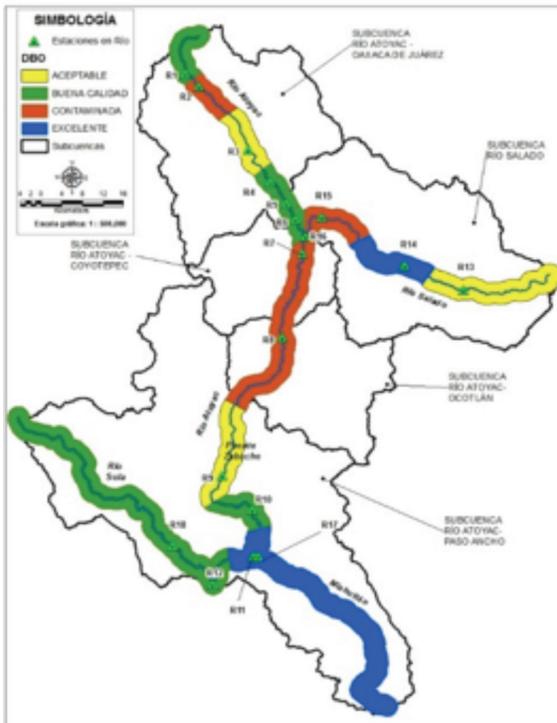
a la DQO (ilustraciones 1 a 4). Respecto a otros parámetros que superan los criterios de calidad del agua, el oxígeno disuelto presenta valores críticos: entre R7 a R9; de igual manera, los sólidos disueltos totales. El color en R5 y, de acuerdo con la NOM-127, en el tramo de R4 a R9. El fósforo total supera en todas las estaciones el criterio de calidad; las grasas y aceites en R3 y en el tramo R7 a R8. Las sustancias activas al azul de metileno (SAAM), de acuerdo con la NOM-127, presentan valores críticos en R2 y en el tramo R7 a R9. Los fenoles superan el criterio en la estación R7; la alcalinidad en el tramo R7 a R9; los coliformes fecales en el tramo R4 a R10, excepto en R7 y R9; el aluminio en los tramos R4 a R6 y en los sitios R10 y R12. Con respecto a la NOM-127, el aluminio también supera el valor crítico en el tramo R4 a R6 y en R10. El arsénico en R8. El fierro supera el criterio en el tramo R4 a R9, el manganeso en el tramo R2 a R11 y, con respecto a la NOM-127, supera el valor recomendado en el tramo R2 a R9.

Destacan dos zonas del río Atoyac y Salado que presentan descargas con un alto grado de incumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (de cinco a siete parámetros fuera de la NOM). En el río Atoyac, la descarga D-1, así como el tramo de descargas D-4 a D-8 (excepto D-6) y, sobre el río El Salado, el tramo de descargas D-18 a D-22. Se observa un alto grado de incumplimiento en los siguientes parámetros (del total de 21 descargas): DQO (17), DBO₅ (13), SST (12), materia flotante (12) y grasas y aceites (10).

Para la fecha del muestreo, el río Atoyac presenta cargas de contaminantes por encima de las asimilables. Es el caso del fósforo, nitratos, sólidos disueltos totales, só-



Ilustraciones 1 y 2. Ubicación de estaciones de muestreo.



Ilustraciones 3 y 4. Calidad del agua en el Atoyac, respecto a DBO y DQO.

lidos suspendidos totales, sólidos totales, aluminio, fierro, manganeso, grasas y aceites, sulfuros, coliformes fecales y SAAM. En el sitio Paso Ancho, los parámetros que exceden la carga admisible del río Atoyac son: fósforo total (604 kg/día), nitratos (173 kg/día), aluminio (110 kg/día) y sulfuros (7.3 t/día), considerando el criterio de calidad del agua para protección de vida acuática.

La evaluación por indicadores biológicos determinó que la calidad del agua, mediante el índice biótico de Hilsenhoff (IBH) en las partes altas del río Atoyac, se encuentra en buenas condiciones; sin embargo, disminuye su calidad en la parte media de la cuenca, después de las descargas de la ciudad de Oaxaca y localidades conurbadas, en el tramo comprendido entre San Juan Bautista y San Martín Lachila. Estos sitios resultaron con calidad de agua, de acuerdo con el IBH, de contaminación severa, puesto que los organismos detectados se encuentran adaptados a condiciones en las que la cantidad de oxígeno es pobre y se han clasificado como organismos muy tolerantes a la contaminación orgánica. Además, los valores del índice de Shannon y riqueza indican que ya no existe diversidad en esa parte del río; es decir, el sistema se encuentra en un estado de degradación muy severa. En la parte baja de la cuenca, la calidad del agua muestra una clara mejoría, ya que el río Atoyac recibe los aportes de dos afluentes importantes: los ríos Miahuatlán y Sola, que se encuentran en muy buenas condiciones de calidad y de estructura de la comunidad.

El análisis de toxicidad señaló dos sitios sobre el río como áreas afectadas por contaminación química tóxica. Las estaciones R7

y R15, ubicadas en el área de confluencia del Atoyac con el río Salado, donde se ubican las descargas de la ciudad de Oaxaca y las municipales D-21 y 22.

En lo que respecta al análisis de los compuestos orgánicos semivolátiles, efectuado en agua de las estaciones R7, R8 y R12 y en sedimento, el Bis-2-Etil hexil ftalato excede el límite máximo permisible (LMP) para protección de vida acuática en los sitios R7 y R8; sin embargo, el valor está por debajo del límite establecido para fuente de abastecimiento. De igual manera, el fenol en R7 y R8, excede el LMP para fuente de suministro.

Con respecto al barrido cromatográfico de compuestos orgánicos semivolátiles (COSV), se pudieron identificar un total de 58 compuestos en las estaciones de río R7 y R8. En la estación R12, en Paso Ancho, sólo se detectaron cuatro compuestos, lo cual sugiere que el río Atoyac, en su trayecto de Zimatlán a Paso Ancho, se autodepura, eliminando prácticamente toda la carga contaminante que afecta a los sitios R7 y R8.

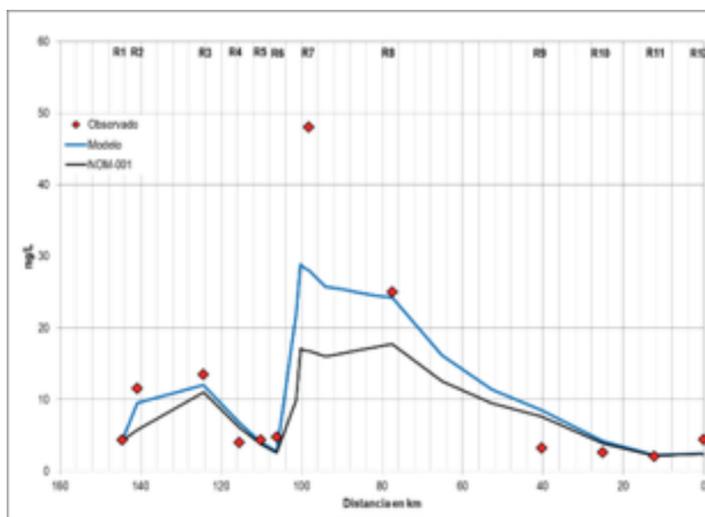
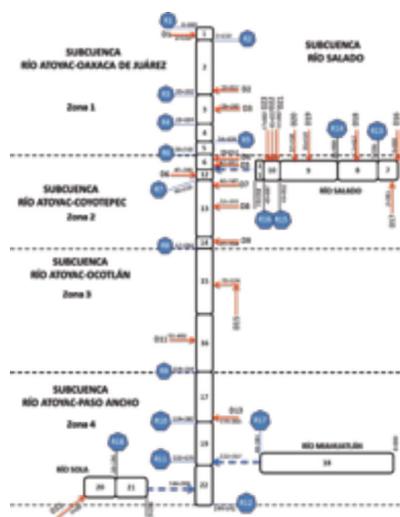
Se modeló la calidad del agua usando la herramienta QUAL2K para las condiciones del muestreo. Se efectuó la modelación con las condiciones de descarga dadas por la NOM-001-1996-SEMARNAT para uso de Público Urbano. Comparando las condiciones actuales con la aplicación de la NOM-001-1996-SEMARNAT en las descargas, se observa que para el caso de la DBO, SST, coliformes fecales y nitrógeno total, el sólo hecho de dar cumplimiento a la NOM-001-1996-SEMARNAT, la calidad del agua tanto en el río Atoyac como en el Salado se verían mejoradas (ilustraciones 5 y 6).

Los resultados del modelo de contaminación por fuentes no puntuales indican que, en promedio, en el sitio Paso Ancho la cuenca transporta 3 770 toneladas anuales de nitrógeno y 425 toneladas anuales de fósforo.

Conclusiones y recomendaciones

La problemática de contaminación en el río Atoyac se asocia directamente con las

descargas de las localidades que se asientan a lo largo del río y sus afluentes, así como la infraestructura de saneamiento actual que, en su mayoría, se encuentra fuera de operación. Considerando los patrones de distribución de contaminantes, toxicidad y el análisis de COSV hallados en este estudio, puede decirse que los contaminantes que provienen de las descargas municipales aportan carga química tóxica con un gran variedad de sustancia sintéti-



Ilustraciones 5 y 6. Esquema unifilar y resultados del modelo de calidad del agua.



Ilustraciones 7 y 8. Río Atoyac, en el sitio Paso Ancho.

cas que puede comprometer la capacidad de asimilación del sistema, especialmente en el sector urbanizado, donde se asientan la ciudad de Oaxaca y los municipios de Zaachila y Zimatlán. Aunque el problema principal aparentemente está acotado en la parte de media de la cuenca, se encontró incumplimiento de los criterios para un par de contaminantes al final de la cuenca. No obstante, en la parte baja de la cuenca la calidad del agua muestra una clara mejoría, ya que el río Atoyac recibe los aportes de dos afluentes importantes: los ríos Miahuatlán y Sola, y escurrimientos de zonas de manantiales que se hallan en muy buenas condiciones de calidad, lo cual nos habla de la presencia de resiliencia del río, de manera que el sistema de afluentes tributarios forman parte importante en la sostenibilidad del río.

Es conveniente extender el alcance del presente trabajo mediante campañas de muestreo adicionales que permitan evaluar la respuesta de la cuenca estacionalmente, tanto en estiaje como en lluvias. Con lo anterior, se tendría la información necesaria para proponer la Declaratoria de Clasificación del río Atoyac y establecer las condiciones particulares de descarga en el corto, mediano y largo plazos, así como proponer los procesos de remoción de contaminantes necesarios en las plantas de tratamiento existentes para cumplir con las metas de calidad, de acuerdo con el uso que se pretende alcanzar y, de esta manera, mejorar la calidad del agua.

Bibliografía

- Aguayo, S., Muñoz, M. J., de la Torre, A., Roset, J., De la Peña, E., Carballo, M. (2004). Identification of Organic Compounds and Ecotoxicological Assessment of Sewage Treatment Plants (STP) Effluents. *Sci. Total Environ.* 26, 328(1-3), 69-81.
- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (1995). *Stream Ecology: Structure and function of Running Waters*. Springer.
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Zinder, B. D., & Stribling, J. B. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. Washington, D.C.: U. S. Environmental Protection Agency. Office of Water, EPA 841- B41-99-002.
- Bueno, S. J. (2010). *Guía de identificación ilustrada de los géneros de larvas de insectos del orden Trichoptera de México*. México: Instituto de Biología, UNAM.
- Bulich, A. A., (1979). Use of Luminiscent Bacteria for Determining Toxicity in Aquatic Environments. In: L. L. Markings & R. A. Kimerle (Eds.), *Aquatic Toxicology* (pp. 98-106). ASTM 667. American Society for Testing Materials.
- CCE-CCA-001-1989 (1989). Criterios ecológicos de calidad del agua. SEDUE- CNA. *Diario Oficial de la Federación*.
- Cummins, K. W. (1996). Invertebrates. In G. Petts & P. Callow (Eds.). *River Biota. Diversity and Dynamics* (pp. 75-91). Oxford: Blackwell Science.
- Jiménez, C. B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa-Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C.-Instituto de Ingeniería de la UNAM- Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.
- McNeely, R. N., Neimanis, V. P., & Dwyer, L. (1979). *Water Quality Sourcebook. A Guide to Water Quality Parameters*.

Ottawa: Inland Waters Directorate. Water Quality Branch.

Weber, C. I. (Ed.) (1991). *Methods for Measuring the Acute Toxicity of Effluent and Receiving Waters to Freshwater and Marine Organisms*. Environmental Protection Agency. EPA-600/4-90-027.

Resumen curricular

Jorge Luis Izurieta Dávila. Ingeniero hidrológico por la Universidad Autónoma Metropolitana y maestro en Ingeniería (Hidráulica) por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: hidráulica urbana, ingeniería ambiental, hidrología y sistemas de información geográfica.

Perla Edith Alonso Eguía Lis. Bióloga por la Universidad Nacional Autónoma de México y doctora en Ciencias-Recursos Bióticos por la Universidad Autónoma de Querétaro. Líneas de investigación: ecología acuática, uso de índices de integridad biótica, indicadores biológicos acuáticos, ecología y distribución de odonatos, ecología de comunidades y evaluación de caudal ecológico.

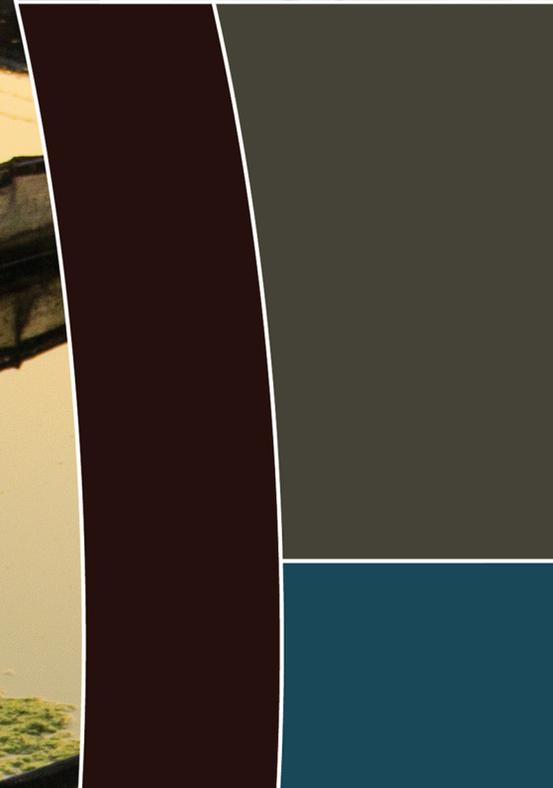
Yolanda Pica Granados. Bióloga y maestra en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: ecotoxicología acuática en ambientes epicontinentales y costeros, riesgo ambiental, sustancias tóxicas, e indicadores

de efecto en el estudio de contaminantes emergentes y biomarcadores.

Gabriela Mantilla Morales. Ingeniera civil y maestra en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México, y doctora en Ciencias y Técnicas del Medio Ambiente por la École Nationale des Ponts et Chaussées-École Nationale de Génie. Líneas de investigación: costos de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales, evaluación de plantas de tratamiento, saneamiento centralizado y descentralizado, y reúso de aguas residuales tratadas.

Antonio Ramírez González. Ingeniero civil y maestro en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: tratamiento de aguas residuales, procesos biológicos de tratamiento, potabilización, sistemas de abastecimiento, tratamiento de lodos, reúso de aguas residuales, sistemas de captación y tratamiento de agua de lluvia e hidráulica aplicada a plantas de tratamiento de agua y aguas residuales.

Luis Alberto Bravo Inclán. Biólogo y maestro en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Líneas de investigación: estudios limnológicos en lagos, embalses y ríos, así como manejo de cuencas, eutroficación y evaluación de fuentes puntuales y difusas.



 **IMTA**
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES

